

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Determinació dels paràmetres d'impressió
mitjançant "Fused Deposition Modeling" (FDM)
amb feedstock tipus "Metal Injection Model"
(MIM) no comercial

MEMÒRIA

Autor: Oriol Nafria Rovira
Directora: Jessica Calvo Muñoz
Convocatòria: Gener 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest treball té com a objectiu l'estudi dels paràmetres d'impressió en 3D pel mètode d'extrusió de pellets del material CrCoMo, amb un polímer desconegut. Per a dur a terme aquest estudi s'ha estudiat els diferents factors que influeixen en el procés d'impressió, acotant en una primera fase els seus valors. Seguidament, s'ha estudiat l'efecte que tenen sobre les peces cadascun d'aquests factors, en l'incrementar els seus valors o en disminuint-los. Per tant, s'obté un plànol bastant extens dels paràmetres que entren en joc i de quina manera ho fan.

Entre els factors estudiats es troben les temperatures, els gruixos de les capes, el dimensionament dels pellets, les velocitats d'impressió, el diàmetre de la tovera i els multiplicadors de flux.

Hi ha una breu explicació teòrica dels estudis factorials complets i fraccionats que fonamenta el disseny d'experiments amb el que es realitza l'estudi dels factors.

També s'explica detalladament com s'imprimeix una peça, què s'ha de tenir en compte, quins són els procediments que s'han de seguir, etc... Bona part d'aquest coneixement ha estat obtingut a base de dedicar-hi hores i de cometre errors. És per això que pot arribar a ser informació molt útil si s'ha de manipular una d'aquestes impressores, fent més àgil la manipulació tant de la impressora com dels seus programes.

Els resultats són presentats al concloure el treball, amb les conclusions que s'ha extret del treball, les consideracions a les que s'ha arribat i el que s'ha après. També s'indiquen els factors que tenen influència significant en la impressió de les peces. Per últim, s'indica quina és la combinació dels valors que han de prendre els paràmetres per a obtenir una bona qualitat d'impressió.

Sumari

SUMARI	4
1. GLOSSARI	7
2. ORIGEN DEL PROJECTE I MOTIVACIÓ	9
3. INTRODUCCIÓ	11
3.1. Objectius del projecte	11
3.2. Abast del projecte	11
4. INTRODUCCIÓ A LA TÈCNICA UTILITZADA	12
4.1. Additive manufacturing “AM”	13
4.1.1. Avantatges i desavantatges de la fabricació per addició	13
4.1.2. Introducció al modelat per injecció de metalls (MIM)	14
4.1.3. Introducció al modelat per extrusió de metall (MEAM)	15
4.1.4. Tipus de fabricació per addició amb extrusió de material	15
5. PROCÉS EXPERIMENTAL	18
5.1. Sistema de impressió	18
5.1.1. Hardware	18
5.1.2. L'extrusor	19
5.2. Software	19
5.2.1. PrusaSlicer	19
5.2.2. Pronterface	22
5.3. Paràmetres d'impressió	23
5.4. Material a estudiar	24
5.4.1. Estudi de densitats	25
5.4.2. Característiques dels pellets	26
6. ESTUDI PRELIMINAR	27
6.1. Factors a tenir en compte	27
6.2. Problemes a solucionar	28
6.3. Recerca de paràmetres adequats	30
6.3.1. Paràmetres a estudiar	30
7. OPTIMITZACIÓ DELS PARÀMETRES D'IMPRESSIÓ	32
7.1. Primer ajustament de paràmetres	32
7.2. Introducció als estudis factorials fraccionats	33

7.2.1.	Dissenys factorials complets	33
7.2.2.	Dissenys factorials fraccionats	34
7.2.3.	Concepte de resolució	34
7.3.	Estudi factorial dels paràmetres	36
7.3.1.	Definició de la variable resultat	39
7.4.	Model utilitzat.....	40
8.	EXECUCIÓ DE L'ESTUDI FACTORIAL	43
8.1.	Disseny de la peça	43
8.2.	Procés d'impressions	44
8.3.	Tabulació de la variable resposta	45
9.	RESULTATS DE L'ESTUDI FACTORIAL	47
9.1.	Variable resposta: DIMENSIONAL	47
9.2.	Variable resposta: PES	49
9.3.	Altres variables resposta	52
9.3.1.	Adhesió de la primera capa	52
9.3.2.	Rugositat	55
9.3.3.	Verticalitat	55
9.3.4.	Ompliment de l'última capa	56
10.	ESTUDI DEL DIÀMETRE DE LA TOVERA	59
	CONCLUSIONS	61
	AGRAÏMENTS	63
	BIBLIOGRAFIA	64

1. Glossari

Additive Manufacturing (AM)

Fused Deposition Modeling (FDM)

Metal Injection Molding (MIM)

Procesos de Conformación de Materiales Metálicos or Metal Forming Processes (PROCOMAME)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Additive Manufacturing File (AMF)

Material Extrusion Additive Manufacturing (MEAM)

Modelat per deposició Fosa (FDM)

Fabricació per feix d'electrons (EBF)

Sinteritzat directe de metall per làser (DMLS)

Sinteritzat directe de metall per làser (DMLS)

Fusió por feix d'electrons de electrons (EBM)

Sinteritzat selectiu per calor (SHS)

Sinteritzat selectiu per làser (SLS)

Projecció aglutinant (DSPC)

Laminat de capes (LOM)

Estèreo litografia (SLA)

Foto polimerització per llum ultraviolada (SGC)

Petites i grans empreses (PIMES)

Universitat de Castilla la Mancha (UCLM)

2. Origen del projecte i motivació

A totes llums, la impressió 3D és la tecnologia que està essent el present i serà el futur en molts camps de la fabricació. D'alguna manera, podríem dir que avui s'està estudiant la tècnica que demà substituirà molts processos d'injecció i d'extrusió de plàstics.

En aquesta línia, el grup d'investigació PROCOMAME (Procesos de Conformación de Materiales Metálicos) del departament de Enginyeria dels Materials de la UPC, ha obert una investigació per aconseguir imprimir metalls mitjançant una tècnica que utilitza dues tecnologies: la MIM (Metal Injection Molding) i la FDM (Fused Deposition Modeling). L'objectiu de la investigació a llarg termini, és portar als particulars i a les PIMES una tecnologia d'impressió 3D en metall que estigui al seu abast.

La motivació és gegant, doncs el grup de treball és jove i el projecte és tant innovador com apassionant. El poder tocar amb les pròpies mans el que és el futur de la impressió 3D, i poder contribuir així a la societat és el motor principal al realitzar aquest projecte.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte és trobar la manera d'agilitzar i abaratir els processos de fabricació de prototips, motlles i peces de metall. La idea és buscar una solució més barata i més àgil a les màquines de impressió 3D que actualment treballen en el mercat, pensant sobretot en particulars i empreses amb poc pressupost.

La fabricació de prototips i de motlles està a l'ordre del dia a les empreses on els departaments de I+D han d'anar avançant en els seus productes i és per això que creiem que hi ha un camp molt gran on investigar. L'objectiu, per tant, és avançar en la direcció que necessiten les empreses per poder proporcionar-li'ls el que necessiten: la fabricació de peces de metall *self-service*.

3.2. Abast del projecte

Aquesta investigació s'adhereix a la que porten fent l'estudiant Tim Ouradnik que va realitzar el TFM amb títol "*Manufacturing and characterization of components produced via fused deposition modeling (FDM) utilizing metal injection molding (MIM) feedstock with a focus on Steel alloy 316L*"^[1] i l'estudiant Alfons Riera que ha realitzat el TFG titulat "*Estudi de la tècnica MEAM utilitzant pellets de MIM aplicada a productes comercials*"^[9] durant sis mesos amb l'aliatge 316L. Ells han estat enginyant un sistema d'impressió, han determinat unes condicions d'impressió, uns paràmetres, unes geometries, etc...

L'abast d'aquest projecte a curt termini és ampliar el coneixement aportat per l'estudi realitzat pel Tim i l'Alfons canviant el material d'impressió per una aliatge de Crom, Cobalt i Molibdè, que ens proporciona la Universitat de Castilla la Mancha.

Canviar de material és tornar a començar de zero, doncs la impressora està configurada per al correcte funcionament del material anterior, el paràmetres d'impressió s'hauran d'ajustar, el flux serà diferent... Per tant, aquest estudi anirà dirigit a determinar els paràmetres d'impressió concrets per a impressions amb el nou *feedstock* no comercial.

4. Introducció a la tècnica utilitzada

El món de la impressió 3D és molt ampli. Hi ha múltiples sistemes d'impressió que funcionen avui dia, però en el desenvolupament d'aquest treball, es focalitzarà només en la tecnologia que engloba el *Fused Deposition Modeling* (FDM). Altres tecnologies dins del modelatge 3D podrien ser la de Sinteritzat Làser selectiu (SLS), la estèreolitografia (SLA), etc... A la taula número 1 es pot veure un esquema de tots els mètodes i tecnologies utilitzades actualment:

Tipus	Mètode	Materials utilitzats
Extrusió	Modelat per deposició Fosa (FDM)	Termoplàstics, metalls
Filament	Fabricació per feix d'electrons (EBF)	Casi qualsevol aliatge
Granulat	Sinteritzat directe de metall per làser (DMLS)	Casi qualsevol aliatge
	Fusió por feix d'electrons de electrons (EBM)	Aliatges de titani
	Sinteritzat selectiu per calor (SHS)	Pols de termoplàstics
	Sinteritzat selectiu per làser (SLS)	Termoplàstics, pols metàl·lica i ceràmica
	Projecció aglutinant (DSPC)	Guix
Laminat	Laminat de capes (LOM)	Paper i alguns plàstics
Fotoquímics	Estéreo litografia (SLA)	Foto polímer
	Foto polimerització per llum ultraviolada (SGC)	Foto polímer

Taula 1: Mètodes de impressió 3D ^[2]

4.1. Additive manufacturing “AM”

La tecnologia AM és la que permet fabricar peces en tres dimensions a partir de metall, materials ceràmics o plàstics utilitzant una metodologia de superposició de capes. Hi ha varies variants de la tècnica AM per addició, però la d'extrusió de material és una de les més utilitzades. A mode de resum, el procés consisteix en que el material és extruït a través d'una tovera o forat. Els materials que són propicis a aquesta tècnica són:

- Pellets o filaments de termoplàstics
- Pellets o filaments de polímers amb metall o materials ceràmics
- Tintes amb pols de metalls o materials ceràmics.

4.1.1. Avantatges i desavantatges de la fabricació per addició

La fabricació per addició té una clara avantatge: la capacitat de produir prototips, peces úniques o dissenys propis, sense la necessitat de cap motlle. Per tant, moltes vegades és la forma més barata de produir prototips. A més, amb la facilitat d'utilització que presenten les impressores que estan al mercat, els dissenys 3D fets per particulars passen de la pantalla a la realitat sense la necessitat d'un expert.

La principal desavantatge que s'hi troba és que la tècnica està molt estudiada per a materials termoplàstics, i moltes d'aquestes impressores que surten a mercat van enfocades a treballar amb aquesta família de materials.

A més a més, tot i que els dissenys 3D que s'imprimeixen poden arribar a tenir molta precisió geomètrica si es coneixen bé els paràmetres d'impressió, les propietats mecàniques deixen molt a desitjar. Al depositar el material seguint un recorregut, la peça no és isotròpica, és a dir, les propietats mecàniques de la peça són irregulars, per molt que s'intenti compensar aquesta anisotropia imprimint les capes en varies direccions.

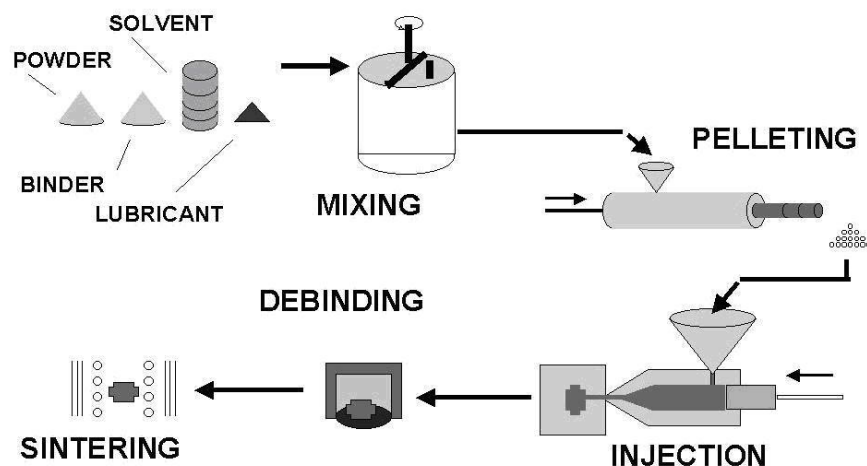
Un altre desavantatge que es troba és que no totes les geometries són acceptables. No són viables geometries amb angles molt aguts, o amb zones volants. Al ser un procés de addició de material per capes, només es pot depositar material si a l'anterior capa se n'ha dipositat. Aquest problema es soluciona imprimint amb diversos materials, de manera que després d'imprimir es pot eliminar les geometries que s'han imprès amb la finalitat de ser l'estructura per a poder dipositar el material. Aquesta solució encareix la impressora, i complica el procés.

Per tant, tot el que s'imprimeixi mitjançant fabricació per addició pot servir per avaluar

geometries, per peces amb una funcionalitat determinada; però no se li ha de demanar cap propietat mecànica.

4.1.2. Introducció al modelat per injecció de metalls (MIM)

La tecnologia MIM (*Metal Injection Modeling*) és la tecnologia predecessora de la MEAM (*Material Extrusion in Additive Manufacturing*). Històricament és la que s'ha utilitzat per produir peces en tres dimensions, a través de la injecció de material. Consisteix en un cargol sense fi que és alimentat per matèria prima, en forma de pellets. Aquesta matèria va avançant pel cargol a mesura que es va escalfant i en conseqüència, fonent. El cargol acaba en una tovera, que injecta material fos a un motlle a través d'un orifici.



Imatge 1: Procés complet del MIM^[10]

El procés per obtenir la peça després de ser injectat el material és senzill: obrir el motlle, i extreure'n la peça, assegurant abans que el material es troba en les condicions adequades de temperatura i solidesa.

Si el material ho requereix, es pot fer un *debinding* per eliminar impureses del material o partícules del material que no interessin, i un *sintering*, per mirar de millorar les propietats mecàniques de la peça.

No cal dir, que respecte la fabricació per addició, en general la tecnologia MIM és més cara. El simple fet d'haver de dissenyar i fabricar un motlle, fa que el preu per unitat produïda s'encareixi molt per a produccions de poques peces. Només surt a compte si s'han de fabricar moltes peces, per aconseguir amortitzar el preu del motlle.

Però no tot són contres. La tecnologia MIM aconsegueix millors propietats mecàniques respecte a la fabricació per addició. Per dues raons principals:

-La primera és que elimina la anisotropia que podria presentar degut a la disposició del material. Al injectar material fos o semi fos les propietats d'aquest a qualsevol punt del motlle son idèntiques. Clar que aquí també entra en joc la geometria de la peça. Però en l'estudi estricte de les propietats del material, no hi ha direccions que suportin millor la tracció o la torsió etc...

- La segona raó és que té un component de pressió que fa millorar moltíssim les propietats mecàniques. El cargol sense fi va injectant material, i la pressió que hi ha dins del motlle va augmentant. El cargol sense fi es regula perquè suporti determinades pressions. Aquest és un factor clau en la millora de les propietats mecàniques respecte a les peces fabricades amb AM.

4.1.3. Introducció al modelat per extrusió de metall (MEAM)

Amb la tècnica MEAM (*Material Extrusion in Additive Manufacturing*) s'acostuma a imprimir amb polímers termoplàstics. Últimament s'ha començat a investigar i s'ha vist que és possible imprimir mitjançant l'extrusió, mescles de metalls i algunes ceràmiques amb polímers. Aquesta és la tecnologia en la que s'ha centrat aquest treball. És una tècnica que agafa la part de l'extrusió del MIM i la idea de superposició de capes del AM. Seguidament s'expliquen els tipus de fabricació per addició amb extrusió de material.

4.1.4. Tipus de fabricació per addició amb extrusió de material

Dins de la extrusió de material, s'hi troben tres grans grups que es diferencien bàsicament per la forma en que li proporcionem el material a la extrusora. A continuació s'explicarà de forma esquemàtica i breu com funcionen cadascun d'ells.

El primer gran grup és el del filament. És segurament el més utilitzat pels usuaris de la impressió 3D a nivell particular. Consisteix en proporcionar-li el material en forma de filament, que ve enrotllat en una bobina. La extrusora, amb l'ajuda de dues rodes dentades va recollint material, i el va posant a disposició de les resistències internes que van augmentant la temperatura del material. És així com s'aconsegueix que el material sigui capaç d'adaptar-se a la forma que els motors de la impressora li imposen al dipositar-la sobre les capes. A continuació es pot veure una il·lustració que mostra l'esquema del funcionament que s'acaba d'explicar.



Imatge 2: Extrusió de filament^[11]

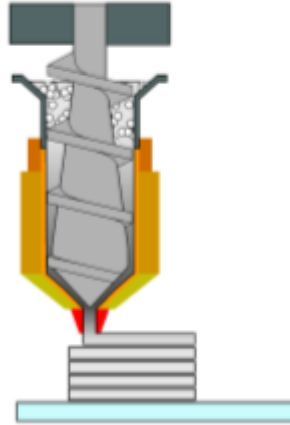
El segon grup el formen les impressores que se'ls subministra el material en pols. La particularitat d'aquestes és que extrueixen el material mitjançant un èmbol que pressiona el material. Les resistències calenten el material aconseguint que agafi certa consistència per poder anar apilant les capes. A continuació es pot veure una il·lustració que mostra l'esquema del funcionament que s'acaba d'explicar.



Imatge 3: Extrusió de material en pols^[11]

El tercer grup, i que és el que interessa per al desenvolupament d'aquest treball, és el que és format per totes les impressores que se'ls hi subministra el material en forma de pellets. Els pellets són volums irregularment esfèrics de material. El seu diàmetre pot ser molt variat. Al subministrar-li a la impressora el material en forma de pellets, el primer que s'ha de fer és

prensar-lo. Una vegada presat amb un cargol sense fi, se li eleva la temperatura per tal d'aconseguir que el material sòlid presat, comenci a fluir. D'aquesta manera ja es pot aplicar el material capa a capa formant la geometria desitjada. A continuació es pot veure una il·lustració que mostra l'esquema del funcionament que s'acaba d'explicar.



Imatge 4: Extrusió de pellets^[11]

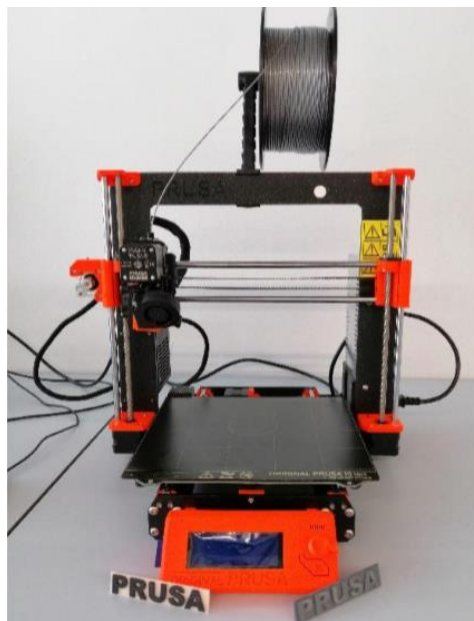
Aquesta aplicació de la tècnica MEAM és l'adequada per a l'estudi que es vol realitzar. Els pellets són ideals per a aconseguir una mescla de polímer i metall. El filament, en canvi, no és viable. El sistema de bobina per anar donant material requereix que la matèria prima del filament tingui unes propietats d'elasticitat i de flexibilitat que són molt difícils d'aconseguir amb una mescla de polímer i metall. Només es podrien aconseguir baixant molt el percentatge de metall de la mescla, i això no ens interessa. Ens interessa que al feedstock hi hagi el polímer just per a que al elevar la temperatura i fondre'l, sigui possible aconseguir un flux de material per dipositar.

5. Procés experimental

5.1. Sistema de impressió

5.1.1. Hardware

El model d'impressora que s'ha fet servir és el Original Prusa i3 MK3. És una impressora que es pot trobar al mercat a partir de 770€, preu molt assequible. Aquest model però, està concebut per imprimir a partir de filaments de PLA i PETg entre altres.^[7]



Imatge7 : Impressora de filament original

L'estructura molecular dels plàstics que s'utilitzen de forma habitual en la impressió 3D permet tenir un llarg i prim filament en una bobina que vagi subministrant material durant la impressió. Això quan es pretén imprimir en metall és impossible de plantejar, doncs no disposem de flexibilitat suficient per doblegar el filament. Per això mateix, a la impressora original se li ha canviat la filosofia de funcionament.

La base permet escalfar-se i conté una làmina d'acer reemplaçable amb una superfície de PEI. Es pot escollir entre dos tipus de làmines: la làmina PEI llisa, que és l'opció predeterminada) i amb PEI amb recobriment de pols texturitzat.

Com no es disposava de la segona opció, i s'ha vist amb les primeres impressions que farà falta una superfície que faciliti l'adhesió de la primera capa, s'ha aconseguit un adhesiu especial per a impressores 3D que garanteix en condicions normals la correcta deposició de

la primera capa.

També s'ha provat l'afavoriment de l'adhesió de la primera capa aplicant ,al llit de la impressora, laca de cabell. El sistema ha resultat prou satisfactori, però degut a que el resultat de la impressió depèn de la quantitat que s'aplica, i aquesta és difícil de parametritzar, s'ha optat per utilitzar l'adhesiu.

5.1.2. L'extrusor

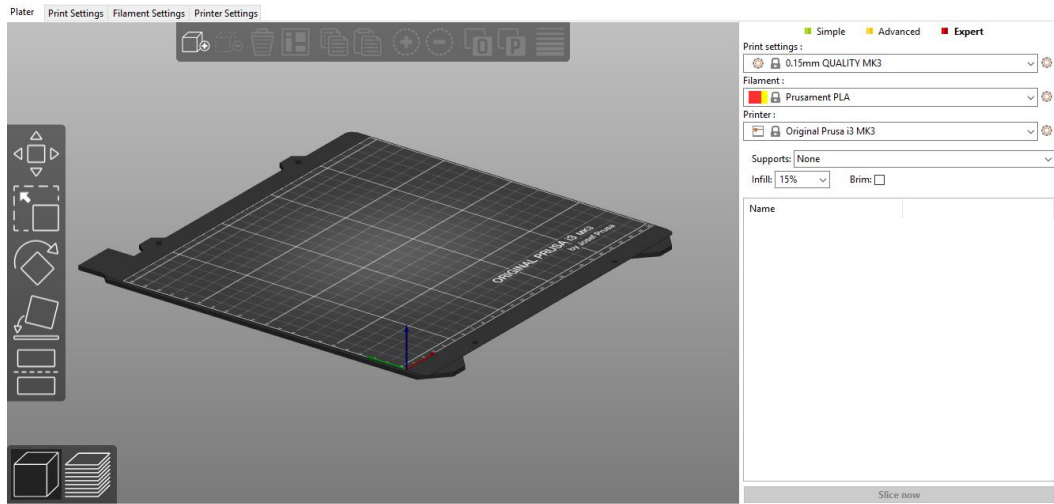
El material , com s'ha comentat anteriorment, es té en forma de pellets, separats per granulometria. Per imprimir pellets en una impressora de filament, s'ha d'acoblar un extrusor de pellets. S'ha comprat l'extrusor Direct3D. Aquest extrusor ve equipat amb toveres de 0,4 a 2,5 mm, amb una capacitat d'expulsar fins a 300 grams de pellets per hora ^[9]. Utilitza el Codi G estàndard que utilitzen la majoria de programes, cosa que ens serà molt útil a l'hora de donar ordres als motors de la impressora i de l'extrusor. Les dues parts, impressora i extrusor, aniran perfectament unificades a l'hora de llegir el codi d'impressió. Si no fos així, resultaria molt difícil donar les ordres d'impressió en llenguatges diferents.

5.2. Software

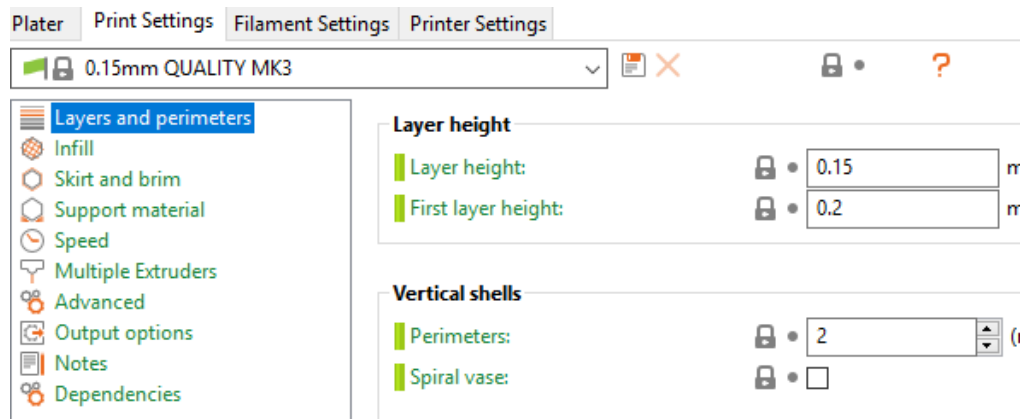
La impressora té dos programes principals per posar-la en funcionament: el *Pronterface*, i el *PrusaSlic3r*.^[4]

5.2.1. PrusaSlicer

El programa on es defineixen tots els paràmetres i que crea el GCode que llegeix la impressora és el PrusaSlicer. És el programa que ve amb la impressora, i que consta de diverses pantalles. Aquí s'explicarà el bàsic que s'ha fet servir per a fer les impressions, però ha de constar que té infinites possibilitats una vegada es domina. A continuació s'explicarà les pantalles del programa, i les opcions i paràmetres que s'hi torben a cada una d'elles.

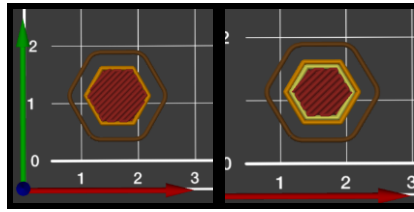
Pantalla 1 (Plater):*Imatge 8: Pantalla inicial del Slicer*

En aquesta, es visualitza la peça que es vol imprimir importada de Solidworks. Des de aquí hi ha múltiples opcions de visualitzar la peça: per capes, per densitats, pel recorregut que farà la impressora, etc...

Pantalla 2 (Print Settings):*Imatge 8: Pantalla de paràmetres*

En la pestanya "Layers and perimeters" s'hi posa:

- El gruix de la primera capa i el de les següents.
- El nombre de perímetres o de controns que se li vol donar a la peça. Aquest paràmetre ajuda a donar-li consistència a la peça depenent de la geometria. A la següent imatge s'hi pot apreciar la diferència entre un i dos perímetres.



Imatge 9: Comparació dels perímetres

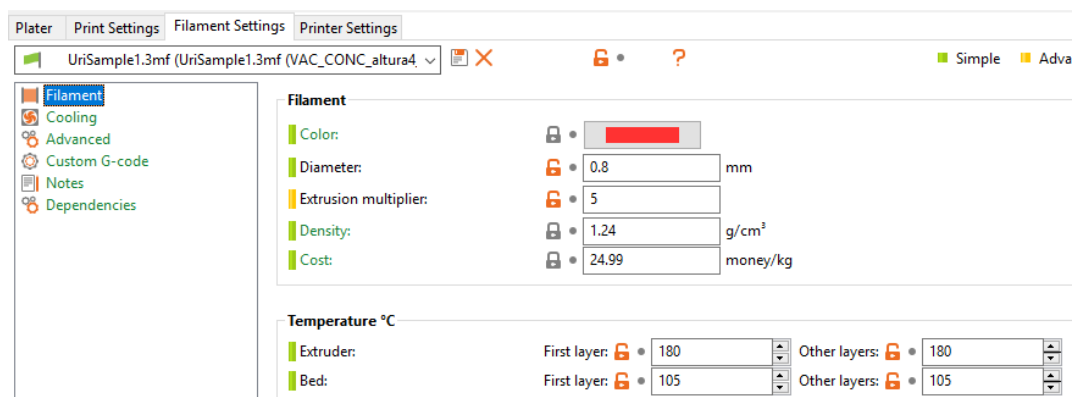
En la pestanya *Infill* s'escull:

- El tipus d'ompliment i la densitat d'aquest (linear, triangular, concentric...)

En la pestanya *Speed*:

- S'escullen les velocitats a les que es vol que l'extrusor es mogui al fer les diferents parts de la peça (perímetres, l'ompliment, la primera capa, els ponts, etc).

Pantalla 3 (*Filament Settings*):



Imatge 10: Pantalla de paràmetres

En la pestanya *Filament*:

- Es defineix el diàmetre de l'extrusor, el multiplicador d'extrusió, i les dades del material del filament. Com el nostre material no és filament, el multiplicador d'extrusió l'hauré d'ajustar als pellets.
- Les temperatures de l'extrusor i del llit; tant a la primera capa com a la resta del cos.

Pantalla 4 (*Printer Settings*):

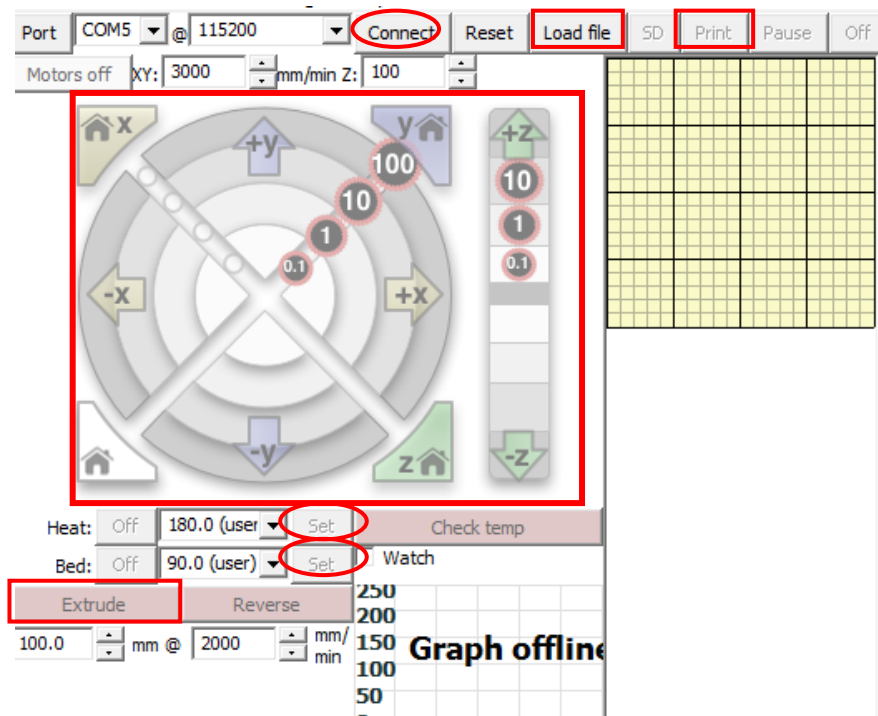
- Aquí s'hi troben opcions avançades com per exemple posar retocs al G-Code,

límits al extrusor, etc... L'únic rellevant és definir bé el diàmetre de la tovera a la pestanya *Extruder 1*.

Un cop s'han definit tots els paràmetres, el tipus d'impressió, la denitat d'ompliment, etc... s'ha d'exportar el document G-Code fent "*File-Export-Export GCode*". Aquest és el document que s'ha de carregar al Pronterface per a enviar a la impressora.

5.2.2. Pronterface

A continuació s'exposaran , per ordre, les funcionalitats marcades al retall de la pantalla del Pronterface:



Imatge 11: Pantalla del Pronterface

1. Connect: Aquí es connecta la impressora amb l'ordinador mitjançant cable. Una vegada connectada ja es pot enviar informació.
2. Quadre de posició: Aquest quadre és per moure la tovera de la impressora i posicionar-la per imprimir. Amb les X i Y es mou pel pla horitzontal, i amb les Z per la vertical.
3. Botó "Set": Aquí es configuren les temperatures de la tovera i del llit i s'envien a la impressora per a que calenti.

4. Botó “Extrude”: Aquí se li envia al cargol sense fi que giri, extruint 100mm de material a 2000mm per minut. Aquests valors es poden canviar. El botó “Reverse”, és per girar en sentit antihorari. Aquestes des funcions son molt útils per desfer taps.
5. Botó “Load File”: És per arregar l'arxiu en GCode que es vol imprimir. Una vegada carregat, es posiciona la tovera al punt d'inici, i se li diu “Print”. La impressora, imprimirà només quan tots els paràmetres reals coincideixin amb els de configuració de l'arxiu GCode. És a dir, esperarà a tenir el llit i la tovera a les temperatures requerides.
6. La barra d'ordres: des d'aquí es donen ordres a la impressora. Abans de començar a imprimir, es posiciona la tovera, i se li diu “G92 X0 Y0 Z0.2” i es clica “Send”. Així li estem dient, que el punt on es troba la tovera, ara es reconfigura, i passa a ser el $X=0$, $Y=0$ i $Z=0.2$ (0.2 perquè la primera capa la fa desde una altura de 0.2 mm).



5.3. Paràmetres d'impressió

Amb les primeres impressions s'ha definit alguns dels paràmetres anteriorment exposats que s'han de definir al PrusaSlicer. Alguns d'ells es deixaran sense definir ja que son els que interessa estudiar i que encara no es sap quina és la finestra de treball amb la que imprimeix correctament.

Per començar, definirem el gruix de la primera capa amb un valor de 0.15 mm i la de les següents amb un valor de 0.2mm. Això s'ha fet així perquè s'ha vist que la primera capa té una complexitat elevada, doncs s'ha d'aconseguir que dipositi correctament sobre el llit. Amb aquest objectiu s'ha vist que és millor baixar el gruix. Per a les següents capes, s'ha vist correcte la elecció de un gruix de 0.2mm.

Seguidament, es pot definir també el nombre de perímetres que es farà a la peça. Com la peça de prova és una geometria senzilla, sense molta complexitat, s'ha optat per fer un sol perímetre.

La densitat d'ompliment teòrica serà de 100%. El patró d'ompliment es fixarà linear, ja que la peça serà hexagonal, i no té sentit complicar les trajectòries de la tovera.

Amb les velocitats d'impressió s'ha vist que a 10 mm/s la impressió va prou ràpid a la vegada que no compromet ni la qualitat de la peça ni la deposició de material. En canvi, s'ha

vist que la primera capa convé fer-la amb més lentitud, ja que sinó el material adhereix amb dificultats.

El diàmetre de la extrusió s'ha de fixar a 0.8 mm, ja que és el diàmetre de la tovera que s'està utilitzant.

Així doncs, deixem com a paràmetres variables els següents: Multiplicador d'extrusió, temperatura del llit i la temperatura de la tovera. Els paràmetres que no s'han mencionat, s'han deixat amb els valors per defecte. Si es donés el cas de que es volgués imprimir una peça diferent, s'hauria de mirar una altre vegada tots els paràmetres i corregir els valors determinats que corresponguessin per aconseguir dur a terme amb èxit la impressió.

A part d'aquests paràmetres que s'acaben d'explicar, n'hi ha d'altres que no tenen a veure amb la configuració del G-Code que s'ha vist que s'han de definir igualment per a mirar de fer les impressions de forma similar.

La separació inicial entre la tovera i el llit s'ha vist que és força determinant per a que les capes, en especial la primera, s'adhereixin correctament. El valor d'aquesta separació teòricament hauria de ser el mateix que el del gruix de la primera capa, però s'ha vist que no és del tot cert. S'ha observat que per aconseguir que la tovera no vagi arrossegant el material dipositat, és convenient començar a imprimir unes dècimes amunt del gruix de capa teòric.

El multiplicador M221 és un multiplicador de flux. La seva funció és la de multiplicar el flux establert pel software PrusaSlicer. Al haver modificat la impressora posant-li un extrusor 3D Direct, el flux que calcula el software no acaba de ser del tot correcte, i s'utilitza aquest paràmetre per ajustar el flux requerit per a la correcte impressió. Aquest multiplicador es calcula mitjançant un seguit de fórmules, explicades a la referència bibliogràfica número 1.

5.4. Material a estudiar

Aquest és un capítol que en qualsevol estudi té una importància primordial, doncs és la base de l'estudi. Sabent les propietats que té el material i la seva composició es poden treure les causes de certs comportaments, com també es pot predir el comportament del material en funció de les condicions a les que està sotmès.

El cas d'aquest estudi és una mica peculiar. El material de treball, se sap que és un aliatge de Crom, Coure i Molibdè. S'ha obtingut per la relació del grup PROCOMAME de la UPC amb la Universitat de Castilla la Mancha. El problema és que al ser un material que ve de una universitat externa, no s'ha pogut obtenir la informació de quin és el polímer principal que fa de conductor. Aquesta informació no s'ha pogut aconseguir perquè forma part del

knowhow que han desenvolupat a la UCLM i no volen estendre'l. Així doncs, s'haurà de fer l'estudi sense tenir tota la visió del camp per on es mourà.

La quantitat total que es té es de 805g en pel·let. La quantitat és una mica justa per a fer l'estudi, per això s'ha mirat de pensar molt bé el què es vol fer, i dissenyar els experiments optimitzant el material a utilitzar.

S'ha separat per granulometries mitjançant dos tamisos: el primer de 1mm i el segon de 2mm. D'aquesta manera, els pellets han quedat separats en tres grups:

- Els de diàmetres menors 1mm (215 grams)
- Els de diàmetres entre 1mm i 2mm (338 grams)
- Els de diàmetres majors 2mm. (252 grams)



Imatge 5: Imatge del material del que es disposa separat per diàmetres

5.4.1. Estudi de densitats

Una dada que interessa saber del material, sobretot per avaluar les mostres que s'imprimiran és la densitat. Només es disposa de pellets irregulars i molt petits per a poder saber la densitat real del material. Per això, s'ha procedit a un càlcul de densitats mitjançant una balança d'Arquímedes a la UPC, al campus del Besos.

La balança s'extreuen dos valors, A i B, que defineixen la densitat del material i el volum de la mostra, en aquest cas un pellet de dimensions gran, mitjançant les fórmules de la imatge número 6:

$$\rho = \frac{A}{A - B} (\rho_0 - \rho_L) + \rho_L$$

$$V = \alpha \frac{A - B}{\rho_0 - \rho_L}$$

Imatge 6: Fórmules de la balança d'Arquímedes^[12]

On A és el pes de la mostra a l'aire, B el pes de la mostra al líquid auxiliar, ρ_0 es la densitat del líquid auxiliar (aigua), ρ_L la densitat de l'aire (0,0012g/cm³) i α el factor de correcció de la balança (0,99985).

Els resultats han estat:

$$A = 0,43\text{g} \quad B = 0,342\text{g} \quad \text{Densitat del material: } 4,87 \text{ g/cm}^3$$

Per tant, podem dir que la densitat del material d'estudi és de 4,87 g/cm³.

5.4.2. Característiques dels pellets

Els pellets que es tenen per a realitzar aquest estudi no tenen una geometria homogènia. Amb la separació per granulometries s'ha guanyat certa homogeneïtat pel que fa a la geometria. Però segueix essent irregular, amb angles aguts i amb diferències que poden afectar a l'extrusor. L'extrusor Direct3D està pensat per a treballar amb pellets comercials, que són molt més regulars. Per tant, s'haurà de tenir en compte que s'està treballant durant en tot el projecte amb un material que difereix una mica per el que està pensat l'extrusor. Hi haurà, segur, una distorsió en la qualitat de la peça i en el desgast del cargol sense fi.

6. Estudi preliminar

Les impressions amb el material d'estudi d'aquest projecte s'han vist posposades a causa de l'allargament dels projectes que estudiaven el 316L. No és recomanable anar canviant de material setmana sí setmana també, així que s'ha hagut d'esperar a que s'acabés les impressions del projecte anterior.

Amb consciència plena de que no es podia perdre el temps, s'ha procurat estar involucrat en el projecte del 316L amb la intenció d'aplanar el terreny d'estudi, veure els problemes que els sorgeixen, els valors dels paràmetres, etc...

Per tant, durant les primeres setmanes de projecte, s'ha estat treballant amb un material comercial, el 316L, diferent al que té per objecte d'estudi aquest treball. Tot i que la seva composició i les seves característiques són diferents al CrCoMo, aquesta presa de contacte prèvia ha permès identificar de forma prou acurada els paràmetres crítics que es trobaran durant la realització de les impressions.

S'ha de tenir present que els valors que prenen els paràmetres d'ajust a la impressió amb feedstock comercial 316L no tenen perquè ser similars als del material d'estudi. No s'ha posat, per tant, l'atenció en els valors amb els que conclouia l'estudi anterior, sinó que l'atenció ha anat cap a la tècnica d'impressió, a agafar agilitat amb la impressora, a la familiarització amb els programes d'impressió, els problemes típics, etc...

6.1. Factors a tenir en compte

El procés de canvi de material és un moment clau per la màquina. S'ha fet amb molta cura, buidant primer el material antic i expulsant durant minuts el material que restava dins del cargol sense fi. S'ha desmuntat i netejat el cargol sense fi procurant que el 316L no deixi rastre que pugui contaminar les següents impressions. Després, una vegada canviat el material pel CrCoMo, s'ha estat extruint sense parar durant uns minuts, per mirar de netejar tot el que pugui quedar. A l'Annex 3 es pot trobar una explicació més acurada del procés de canvi de material.

S'ha de tenir en compte que la quantitat de material del que es disposa és molt limitada: 805 grams. Les impressions s'hauran d'efectuar de manera molt estudiada. No hi ha lloc per a la improvisació.

6.2. Problemes a solucionar

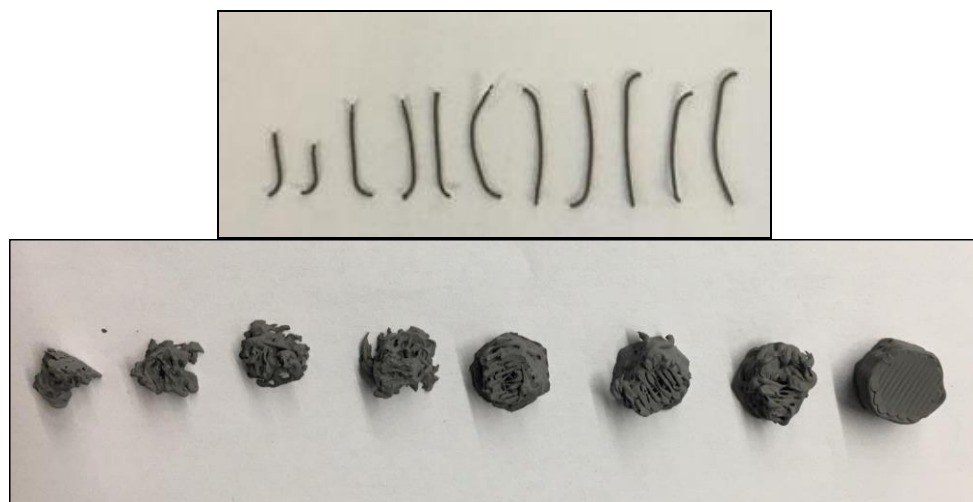
Durant les primeres impressions s'ha trobat que hi ha uns problemes que sorgeixen de forma freqüent que dificulten molt la obtenció d'un bon resultat.

El primer d'ells és la formació de taps i retencions a l'extrusor i al cargol sense fi. La explicació d'aquests no s'ha aconseguit trobar, ja que no s'ha observat que la seva aparició vingués de forma sistemàtica, o després d'algun procediment concret. L'únic que se sap és que de tan en tant, apareixen taps que dificulten l'extrusió del material.

La conseqüència d'aquests taps és la falta de material extruït, i per tant, la malformació de la peça impresa. La falta de material a la peça normalment és patent a simple vista, però pot passar que no ho sigui, i es doni per bona una impressió que s'ha executat amb un tap que influeix poc al resultat final. És per això que necessitem determinar uns indicadors per a saber de forma quantitativa si a l'extrusor o al cargol sense fi hi ha un tap.

El que s'ha fet és fixar quina quantitat de material ha de sortir extruït des del PronterFace 200 mm a una velocitat de 2000 mm/min, fixant la temperatura de l'extrusor a 180°C. Fent un seguit d'extrusions a aquestes condicions, s'ha vist que per poder considerar que no hi ha tap, el pes del filament extruït ha d'estar entre els 0,2 g i els 0,25 grams (òbviament aquests valors canviaran depenent del diàmetre de tovera utilitzat).

El procediment per desfer un tap és senzill. Primer s'ha de pujar la temperatura de l'extrusor per mirar de que amb la temperatura, el material taponat guanyi fluïdesa i així es faciliti el seu desestancament. Després s'ha de girar el cargol sense fi en sentit horari (extruïnt material) i en sentit antihorari (fent pujar el material). Això es va fer durant una estona fins que es vegi que el filament del material comença a tenir els valors de pes determinats com a bons.



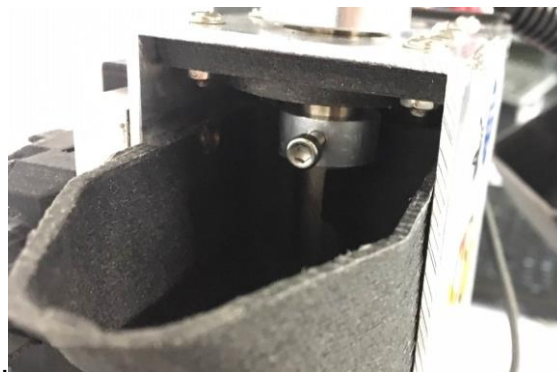
Imatge 12: Evolució del destapament

Com es pot veure a la imatge 12, hi ha una gran diferència entre les extrusions de l'esquerra (amb tap) i les de la dreta (amb el tap progressivament dissolt). La quantitat de material és molt diferent, i és per això que és tan influent en el resultat final.

L'altre problema és el que s'ha denominat "cracking". Sorgeix especialment quan el diàmetre de pellet és gran, i el cargol sense fi exerceix pressió sobre aquests. La mala posició que tenen respecte les guies del cargol sense fi, fa que comencin a fer soroll i a resistir a la força que els exerceix el cargol sense fi. El problema principal és que els pellets que tenen aquest problema encara no estan suficientment calents com per amollar-se a les exigències del cargol, i li provoquen una resistència al moviment rotatiu. Aquest parell acaba traslladant-se a la cinta, i al motor de l'extrusor 3D Direct, que si el parell de resistència és superior al que pot proporcionar, el motor no gira i en conseqüència es deixa d'imprimir material. Això és momentani, però la suma d'imperficcions acaba afectant al resultat de la impressió.

Aquest problema es soluciona controlant el diàmetre dels pellets. Com s'ha dit, només per a diàmetres grans es produeix aquest fenomen. Si per exigències de l'estudi, es dona el cas que els pellets han de ser tan grans que es produeix el "cracking", es pot controlar posant poc material a la cubeta d'aprovisionament, o removent-lo a mesura que s'imprimeix. També es pot controlar disminuint la velocitat de rotació del cargol sense fi.

Un tercer problema que s'ha trobat és el del fregament del cargol que limita el moviment vertical del cargol sense fi. Aquest, si la cinta no s'ha tensat bé durant el procés de canvi de material, toca amb la carcassa del motor, i fa retenir el cargol sense fi. L'impacte final a la peça impresa és poc, però si que provoca desgast i soroll



Imatge 13: Cargol que impedeix el moviment vertical del cargol sense fi

6.3. Recerca de paràmetres adequats

L'objectiu principal de l'estudi preliminar és l'adaptació al nou material. Fins ara tot el que s'ha fet ha estat amb l'aliatge 316L, i els paràmetres que s'han donat per bons poden canviar dràsticament.

La metodologia seguida per començar l'estudi preliminar ha estat la de prova-error. S'ha buscat apropar-se a uns paràmetres correctes per a la impressió, partint dels que ja es donaven per bons amb el 316L. A l'annex es pot trobar el diari amb els paràmetres de tots els experiments executats en aquest estudi previ.

6.3.1. Paràmetres a estudiar

El primer que s'ha fet ha estat la enumeració dels paràmetres que tenim com a variables modificables que fan variar el resultat final de la impressió. Aquests són tant els que es poden programar des de el software del PrusaSlicer, com els externs al software:

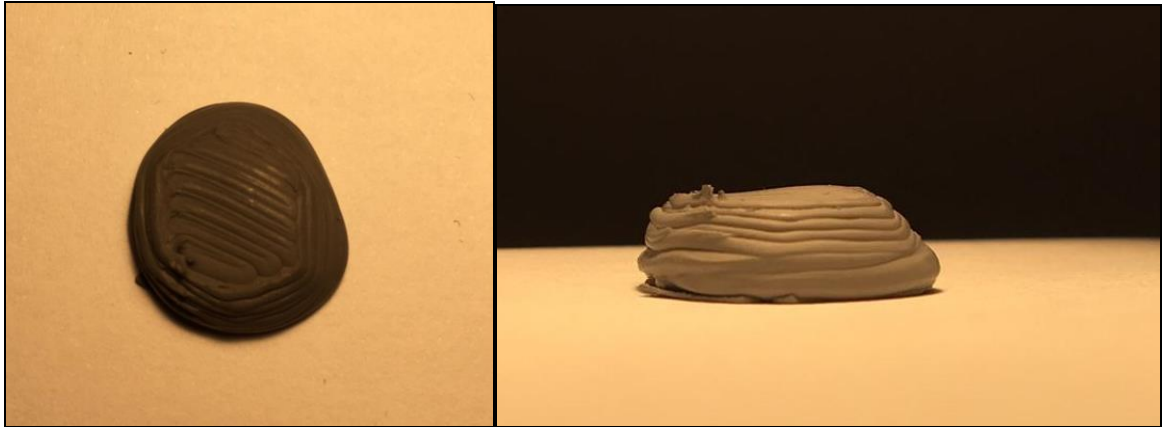
Tª tovera	Tª Llit	Velocitat d'impressió	Velocitat d'extrusió	Gruix de capa
M221	Diàmetre Pellets	Distància inicial tovera-llit	Diàmetre d'extrusió	Condicions externes

Taula 2: Primera selecció de paràmetres

Seguidament, s'ha procedit a anar modificant el valor de les variables anteriors, fins a aconseguir un bon resultat del que poder basar-se a l'hora de fixar els valors del disseny factorial.

Després de fer aquests ajustaments als valors de les variables i tal com es pot veure a l'annex, s'ha arribat a un seguit de conclusions pel que fa a l'aproximació dels valors.

Veiem que la Tª de a tovera i la Tª del llit s'han de baixar respecte als valors en els que ens movíem amb el 316-L. El material d'estudi sembla que té un comportament més accentuat amb la temperatura, i adquireix unes característiques de fluïdesa molt més accentuades que el 316-L. Això comporta que al executar la impressió amb les temperatures anteriors, el material no té consistència, hi ha un flux elevat de material i la gravetat és capaç de desfer el contorn de la peça amb el simple pes del material dipositat a la capa superior. S'obtenen unes peces desfetes, sense dibuix i poc definides.



Imatge 14: Conseqüències de T^a tovera i T^a llit elevades

La velocitat de impressió s'ha vist que és un paràmetre a tenir en compte. No perquè afecti directament a la impressió o a la manera en que es diposita el material, sinó pels efectes secundaris que comporta. S'ha observat que la posició de la tovera té unes toleràncies que afecten a la impressió. Aquest error fa que la tovera vagi fregant puntualment en els millors casos i de forma continua en els pitjors amb el material dipositat en l'anterior capa. A part de que el material ja dipositat es veu afectat en la distribució, la tovera va acumulant material dificultant la extrusió de material. Variar la velocitat pot fer millorar la precisió de la posició de la tovera i fer que aquest fregament amb el material no tingui conseqüències majors.

Amb el gruix de capa s'ha vist que no se li pot exigir la precisió que es tenia amb el 316-L. En el cas del material d'estudi, s'ha d'augmentar el gruix de capa per garantir la consistència i la forma de la peça fins que el material es solidifica del tot.

Amb el multiplicador de flux M221 s'ha vist que s'ha de baixar respecte al que es feia servir amb el 316-L. El material guanya fluïdesa amb molta facilitat i el flux que s'obté amb els multiplicadors que s'aplicaven amb el 316-L (valors entre 6 i 7) és elevadíssim.

Per últim s'ha de comentar que els altres paràmetres no s'han trobat tant rellevants a l'hora d'influenciar la impressió. En l'estudi del disseny factorial s'explica de quina manera afecten, i com es bloquejaren.

7. Optimització dels paràmetres d'impressió

7.1. Primer ajustament de paràmetres

Abans de procedir a un estudi factorial per a veure quines variables afecten al resultat final i de quina manera ho fan, s'ha posat en marxa unes impressions modificant variables amb certa aleatorietat tot prenent notes dels experiments realitzats. D'aquí s'extreuen les primeres dades de les variables que influeixen en la impressió del material CrCoMo. Fins ara es suposaven les variables, però no és fins que s'han fet aquests experiments que no sabem del cert quines son les variables que afecten, quines dificultats s'hi troben, etc...

Durant aquesta etapa d'experimentació s'ha vist que de les variables que a l'apartat 6.3.1 s'han mencionat, n'hi ha quatre que podem ometre per a l'estudi factorial a realitzar.

La primera d'elles és la de la velocitat d'extrusió. Aquesta variable és la que controla la velocitat amb la que surt el material. No s'ha de confondre amb la velocitat d'impressió, que té a veure amb la velocitat amb la que es mou la tovera. Al canviar la velocitat d'extrusió, no s'aprecien diferències significatives en quan a pes ni geometries al resultat final de la impressió.

La segona és la separació inicial entre la tovera i el llit. Aquí s'ha d'especificar bé. Al programa se li posa una distància teòrica (que és la del gruix de capes), però després, al posicionar inicialment la tovera es pot enganyar la impressora dient-li que està a una distància diferent de la que ella creu. Després de fer proves, s'ha vist que la distància ideal per iniciar la impressió, és unes dècimes de mil·límetre més gran que el gruix de capes. Per tant, aquesta variable serà bloquejada, posant-hi com a valor fix unes dècimes major al gruix de capes.

La tercera variable que s'ha decidit no estudiar en aquest disseny factorial és la de el diàmetre de la tovera. Aquest estudi és molt interessant per saber fins a quines precisions s'és capaç d'imprimir amb aquest material, però s'ha decidit fer un estudi aïllat. El canvi de tovera continu dificultaria la execució del disseny, i podria influir notablement en els resultats dels experiments.

Per acabar, les condicions externes de temperatura i de humitat influiran en els resultats. Però aquests factors no son modificables segons el que interessi, ja que no es disposa dels mitjans. Per tant s'haurà de bloquejar aquests dos factors que influeixen en la impressió.

7.2. Introducció als estudis factorials fraccionats

7.2.1. Dissenys factorials complets

Un disseny factorial complet és un experiment en el que el seu disseny consta de dos o més factors, cadascun dels quals amb diferents valors o nivells. Aquest tipus d'experiments permeten l'estudi dels efectes que té cada factor sobre la variable resposta, així com també l'estudi de les interaccions entre factors.

Per exemple, en el cas d'aquest estudi, permet saber quins són els paràmetres d'impressió que influeixen sobre la variable resposta (que encara s'ha de definir). A cada paràmetre se li assignen dos nivells sobre els que pivotarà durant els diferents experiments del disseny.

El problema ve quan es té un nombre elevat de factors d'estudi. Un estudi factorial complet implica que s'han de realitzar 2^k experiments, essent k en nombre de factors que es volen estudiar. Si per exemple es volen estudiar set factors diferents, s'han de fer 128 experiments, cosa que depenent de les circumstàncies i els recursos que es tenen, es fa difícil portar-los a terme.

Per tant, és evident que al realitzar dissenys factorials complets, el nombre de experiments augmenta ràpidament quan s'ha de treballar amb molts factors.

En els dissenys factorials s'ha de diferenciar els efectes principals de les interaccions. Un efecte principal és l'efecte d'un sol factor sobre la variable resposta definida a l'experiment. Aquest efecte és directe, sense cap tipus d'influència dels altres factors d'estudi. En canvi, una interacció és l'efecte que produeix sobre la variable resposta la interacció de dos o més factors d'estudi. El nombre de efectes principals és el nombre de factors d'estudi que hi ha al disseny. Per exemple, si es tracta d'un disseny 2^5 amb els factors A, B, C, D, E; es tindrà:

- Efectes principals: A, B, C, D, E = 5 efectes principals
- Interaccions de 2: AB, AC, AD, AE, BC, BD, BE, CD, CE, DE = 10
- Interaccions de 3: ABC, ABD, ABE, ACD, ACE, ADE, BCD, BCE, BDE, CDE = 10
- Interaccions de 4: ABCD, ABDE, ABCE, ACDE, BCDE = 5
- Interaccions de 5: ABCDE

Les interaccions de tres o més factors són casi sempre no significatives doncs hi ha molts factors intervenint. En les que s'hi ha de posar l'ull per veure com influeixen sobre la variable resposta són les interaccions de dos factors.

7.2.2. Dissenys factorials fraccionats

Quan es vol treballar amb varis factors, sovint s'utilitzen els dissenys factorials fraccionats.

La idea dels dissenys factorials fraccionats és fer menys experiments dels necessaris en un disseny factorial complet. Lògicament, hi ha informació que es perdrà. La gràcia és fer que la informació que es perdi no sigui rellevant.

Com s'ha explicat anteriorment, en un estudi factorial complet de 5 factors es tenen 5 efectes principals, 10 interaccions de 2, 10 interaccions de 3, 5 interaccions de 4 i una de cinc. La idea dels dissenys factorials fraccionats és menysprear les interaccions de més de 2 factors que mai aporten res significatiu a l'estudi, i aprofitar aquesta reducció de interaccions per afegir factors a l'estudi.

La informació que es perd és poc valuosa, i a canvi, es pot obtenir informació de altres factors que sí que ens és útil. Per contra, en els estudis factorials fraccionats ens apareix el que anomenen les confusions d'efectes.

Les confusions apareixen entre les interaccions de factors. Depenent del disseny realitzat, podem veure que la interacció AB es confon amb la interacció DE i la BCE. Això vol dir que si ens surt com a interacció significativa AB, s'haurà de fer un estudi addicional per saber si realment és significatiu AB o ho és DE. És a dir, s'ha de desfer la confusió afegint experiments, només en el cas de que hi hagi una interacció que sigui significativa.

El càlcul de les confusions en un disseny factorial fraccionat és un pèl complex, i està explicat en l'Annex 5.

7.2.3. Concepte de resolució

La resolució d'un estudi factorial fraccionat té una relació directe amb el nombre de generadors que s'utilitzen en el seu disseny. Els generadors, com s'explica a l'Annex 4 són el nombre de factors que son creats a partir de la combinació d'altres factors. Per exemple, si el disseny és un 2^{4-1} , el generador és $D=ABC$. D'aquí es treu la relació de definició, que s'anomena "I", que és la multiplicació dels factors del disseny per el generador. En el cas del 2^{4-1} anterior seria: $I = ABC \cdot D = ABCABC$. La resolució és el nombre de factors mínim que conformen la relació de definició I. En aquest cas, seria de resolució 4 (ABCD).

En el cas del 2^{5-2} , es tindria:

- Generadors: $AB = D$; $AC=E$
- Relació de definició: $I=ABD=ACE=BCDE$. Per tant, es tindria resolució 3.

La resolució del disseny s'indica juntament amb el tipus de disseny que s'utilitza, amb nombres romans (per exemple 2^{4-1}_{IV}). És important saber la resolució del disseny, doncs la resolució indica les pitjors confusions que obtindrem durant l'estudi dels resultats.

En la imatge número 15 es pot veure la relació que hi ha entre resolució i les confusions del disseny. Es mostren les pitjors confusions que es poden trobar en cada resolució:

Resolución	Confusión
III	1 + 2 Efectos principales con interacciones de 2
IV	1 + 3 Efectos principales con interacciones de 3 2 + 2 Interacciones de 2 entre ellas
V	1 + 4 Efectos principales con interacciones de 4 2 + 3 Interacciones de 2 con interacciones de 3

Imatge 15: Esquma de les confusions segons resolució

En la resolució III, obtindrem confusions entre efectes principals (1) i interaccions de dos factors (2).

En la resolució 4 s'obtindran dos tipus de confusions:

- Entre efectes principals i interaccions de tres factors (per exemple $A=BCD$)
- Entre interaccions de dos factors (per exemple $AC=BD$)

Com a conclusió, es veu que a mesura que disminueix la resolució es troben un major nivell de confusions.

7.3. Estudi factorial dels paràmetres

Dels paràmetres que s'han exposat en el punt 6.3.1 s'han d'escollir quins d'ells formaran part de l'estudi factorial.

T ^a tovera	T ^a Llit	Velocitat d'impressió	Velocitat d'extrusió	Gruix de capa
M221	Diàmetre Pellets	Distància inicial tovera-llit	Diàmetre d'extrusió	Condicions externes

Taula 3: Proposta de paràmetres d'estudi

D'inici tenim 10 variables que es creu que afecten al resultat final de la impressió. Durant les experimentacions prèvies a la realització del disseny s'ha vist que la velocitat d'extrusió no té un efecte directe a la quantitat de material que surt per l'extrusor. El valor de material extruït s'està controlant amb la velocitat d'impressió i el multiplicador de flux M221, el que fa que la velocitat d'extrusió sigui un paràmetre redundant. És cert que té un caràcter d'estudi interessant, doncs potser variant la velocitat d'extrusió es pot disminuir l'efecte del cracking, però s'ha de sacrificar un dels tres factors per a poder realitzar el disseny amb èxit.

Les condicions externes a les que està sotmès l'experiment, influeixen en el seu resultat. Com no hi ha recursos per mirar de controlar la temperatura i la humitat, i fixar-ne dos nivells per estudiar-les com a factors del disseny, s'ha decidit que siguin factors de bloqueig. D'aquesta manera, encara que se sàpiga que poden influenciar en les impressions, al estar bloquejades no influenciaran els experiments que es realitzin. El bloqueig es durà a terme intentant fer tots els experiments un mateix dia, amb els mateixos valors de humitat i temperatura ambient.

La distància inicial entre la tovera i el llit, com s'explica en el punt 5.3, s'ha fixat a unes dècimes per sobre del gruix de la primera capa.

Un altre factor que s'ha vist que afecta al resultat de la impressió i que no està a la taula 2, és el temps que porta la impressora de funcionament. S'ha notat que al imprimir dues vegades la mateixa peça amb els mateixos paràmetres, les mostres que s'obtenen són diferents. Això s'ha atribuït a que si la impressora s'acaba d'encendre, s'ha d'arribar a un règim estacionari per a poder fer les impressions. Així doncs, les impressions del disseny factorial es duran a terme assegurant que la impressora està en règim estacionari.

Per últim, s'ha pres la decisió d'estudiar posteriorment l'efecte del diàmetre de la tovera en

un estudi a part. Aquest estudi és força interessant per saber fins a quines precisions es pot imprimir el material, però s'ha deixat de banda en aquest disseny, perquè l'objectiu no és saber com afecta al resultat final, sinó que és saber fins a quin diàmetre és possible imprimir tenint un resultat bo.

Finalment, els factors d'estudi son:

T ^a tovera	T ^a Llit	Velocitat d'impressió
M221	Diàmetre Pellets	Gruix de capa

Taula 4: Paràmetres finals d'estudi

Aquests sis factors prendran dos nivells – alt i baix - que com s'ha explicat amb més deteniment al punt anterior, mitjançant un model estadístic s'aniran combinant els nivells alts i baixos de cadascuna de les variables en diferents experiments. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir el nombre d'experiments a realitzar, sense renunciar a la informació significativa que ens aportarien cadascun d'ells. Una vegada realitzats tots els experiments, es valora el resultat final de cada experiment i es defineix la variable "Resultat".

Per a que els resultats vagin d'acord amb la realitat, s'ha de plantejar un bon disseny. És per això que és de crucial importància seleccionar bé tant els factors de control com els nivells que prendran.

A la taula número 4 es mostren els factors d'estudi seleccionats, amb els nivells que prendran. Aquests valors s'han seleccionat després de realitzar impressions i veure quins valors havien de prendre per a dur a terme un bon estudi. Es pot veure el procediment a l'Annex 2.

Tipus	Factors	Nivells	
		-1	+1
Factors de control	Temperatura llit	90°C	100°C
	Temperatura Extrusor	180°C	190°C
	M221	4	6
	Gruix de capa	0.3	0.5
	Velocitat de tovera	5 mm/s	10 mm/s
	Diàmetre dels pellets	<1 mm	>2 mm
Factors de soroll (bloquejats)	Humitat	50%	
	Temperatura ambient	23°C	
	Diàmetre tovera	0,8 mm	
	Distància tovera-llit	Gruix capa + 2 dècimes	
	Temps de funcionament	1 impressió (5 minuts)	

Taula 5: Taula amb els factors i nivells

Cal explicar que els factors de soroll influeixen en l'experimentació. Però això no treu que es pugui fer que el seu impacte sigui mínim. A més, fixant-los s'aconsegueix que l'impacte que tenen, encara que sigui mínim, sigui igual per a tots els experiments.

La temperatura ambient és el primer factor de soroll a tractar. El laboratori on es troba la impressora està al voltant del 23°C. Però la temperatura puja o baixa en funció de si el dia és més calorós o menys. Aquest factor s'inhibirà realitzant tots els experiments el mateix dia, procurant que la temperatura no variï significativament.

El temps que ha estat en funcionament prèviament també influeix en la qualitat de la impressió. El flux, tot just encendre la impressora, no té les mateixes propietats que el que surt al cap d'una estona. Aquest factor es bloquejarà fent que els experiments estiguin precedits d'un prèvia extrusió de material durant un temps 5 minuts.

La humitat és la que més varia entre experiment i experiment. Si el dia és plujós, la humitat relativa és del ordre de 80% i 90%. En canvi, en dies secs, ens trobem per sota del 50% d'humitat relativa. Aquest factor no es pot controlar, però si que es pot buscar una homogeneïtat entre experiments. Els experiments es faran el mateix dia. Si no s'aconsegueix fer-los tots en un mateix dia, serà requisit que al continuar els experiments, la humitat sigui la

mateixa que la del primer dia, amb un error del 5%.

7.3.1. Definició de la variable resultat

La segona part d'un disseny factorial és definir quina serà la variable "resultat". Tant important és fer un bon disseny prenent les variables i els nivells correctes, com saber seleccionar la variable resultat adequada. En el cas concret de l'estudi, l'objectiu és poder quantificar les impressions efectuades en funció de lo bones que son. El terme "bones" és molt subjectiu, és per això que s'han definit tres variables resultat:

La primera variable resultat amb la que s'efectuarà la l'estudi és el pes de la peça. S'ha mesurat la densitat del material i s'ha calculat el pes que hauria de tenir la peça si tingués fos òptima, és a dir un 100% de compliment. D'aquesta manera se sap si la quantitat de material que s'ha extruït és menor o major a la que hi hauria d'haver en el cas òptim.

La segona variable resultat que s'estudiarà és la dimensió de la peça. Amb el fi d'avaluar la qualitat de la peça, es prendran mesures de la base i l'altura de la peça, i es compararan amb les del cas òptim.

En un tercer grup de variables resposta s'ha valorat varies variables resposta. Els criteris de valoració seran els següents:

- Adhesió de la primera capa: Puntuació del 1 al 10 segons la quantitat d'àrea que ha estat adherida correctament de la primera capa.
- Rugositat entre capes: Puntuació del 1 al 10 de la rugositat de la laterals de la peça. Es prendrà com a 10 la millor mostra, i 1 la pitjor.
- Verticalitat dels costats: Angle que forma amb la horitzontal.
- Ompliment de la última capa: Puntuació del 1 al 10 de la superfície de la última capa. Com es pot veure a la imatge número 16, és a la última capa on es pot veure la quantitat de material que hi ha a la peça. Podem tenir una idea del percentatge d'ompliment que hi ha a la peça.



Imatge 16: Ompliment de la última capa

Cada peça obtindrà una puntuació sobre un total de punts. L'objectiu del disseny es centrarà en buscar els factors que influeixen a aconseguir que aquesta puntuació sigui màxima.

7.4. Model utilitzat

Al tenir sis factors a estudiar, s'ha decidit fer un estudi factorial fraccionat per mirar de reduir el nombre d'experiments a realitzar i així facilitar l'etapa d'experimentació. Les diferents opcions que eren possibles eren les següents:

- El disseny factorial complet 2^6
- Els dissenys factorials fraccionats 2^{6-1} i 2^{6-2}

Fer un disseny 2^6 significa la realització de 64 experiments. Aquesta opció no és viable, ja que implica fer 64 impressions d'uns 5 minuts cadascuna, i un mínim de dues vegades en el millor dels casos per veure que els resultats de les impressions del mateix experiment son similars. En el cas de que no fossin similars, s'hauria de fer una tercera impressió per veure si aquesta tercera és similar a alguna de les dues anteriors. Això suposaria un total d'entre 11 i 16 hores. La opció de fer el disseny factorial complet ha estat desestimada, ja que son moltes hores mantenint els factors de soroll estables, i més material del que es disposa.

El que ha decantat la balança entre el disseny 2^{6-1} i 2^{6-2} ha estat la quantitat de material disponible. És prioritari poder acabar el disseny. Si degut a escollir el disseny 2^{6-2} s'ha de fer més impressions puntuals per desfer confusions, ja es faran. Però el disseny principal s'ha d'assegurar tenir material suficient per acabar-lo.

S'ha optat pel disseny factorial fraccionat 2^{6-1}_{IV} . Aquesta decisió implica augmentar el nombre de confusions en el disseny, que en el cas que ens surtin alguna d'elles significatives s'haurien d'estudiar posteriorment amb més experiments específics per eliminar la confusió.

El disseny escollit ens porta a tenir diferents confusions amb resolució IV on tenim: I=ABCE=BCDF.

Per a realitzar i analitzar el disseny d'experiments s'ha utilitzat el software de *Minitab*, ja que permet de forma senzilla avaluar els factors de control, i extreure'n conclusions

Per tant, al *Minitab* s'ha fet el disseny d'experiments 2^{6-2} de manera aleatòria. En principi, l'ordre de les proves ha de seguir un ordre aleatori, però s'ha pensat que si es retoca una mica, es pot garantir un millor bloqueig dels factors de soroll.

Els factors codificats són:

A: Temperatura del llit

B: Temperatura de tovera

C: Paràmetre M221

D: Diàmetre dels pellets

E: Velocitat de la tovera

F: Gruix de capa

L'ordre dels experiments no és aleatori. S'han ordenat els experiments per el factor D (diàmetre de pellets) per no haver de canviar en cada experiment el *feedstock* de material i fer l'operació de canvi de material.

Amb l'explicació anterior, l'ordre de la elaboració dels experiments i el nivell que han de prendre els diferents factors és el següent:

Nº	A	B	C	D	E	F
1	-1	1	-1	-1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	1	-1	1	-1	-1
4	1	1	1	-1	1	-1
5	-1	1	1	1	-1	1
6	-1	1	-1	1	1	-1
7	-1	1	1	-1	-1	-1
8	1	1	-1	-1	-1	1
9	1	-1	1	1	-1	-1
10	1	-1	-1	-1	1	-1
11	-1	-1	1	-1	1	1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1
13	-1	-1	-1	1	-1	1
14	-1	-1	1	1	1	-1
15	1	-1	1	-1	-1	1
16	1	-1	-1	1	1	1

Taula 6: Taula amb els experiments en ordre.

S'ha de tenir present que a aquest disseny li correspon una taula d'àlies, és a dir, les possibles confusions que tindríem en el cas de que sortís significativa una interacció.

Alias Structure

```

I + A*B*E*F + A*C*D*E + B*C*D*F
A + B*E*F + C*D*E + A*B*C*D*F
B + A*E*F + C*D*F + A*B*C*D*E
C + A*D*E + B*D*F + A*B*C*E*F
D + A*C*E + B*C*F + A*B*D*E*F
E + A*B*F + A*C*D + B*C*D*E*F
F + A*B*E + B*C*D + A*C*D*E*F
A*B + E*F + A*C*D*F + B*C*D*E
A*C + D*E + A*B*D*F + B*C*E*F
A*D + C*E + A*B*C*F + B*D*E*F
A*E + B*F + C*D + A*B*C*D*E*F
A*F + B*E + A*B*C*D + C*D*E*F
B*C + D*F + A*B*D*E + A*C*E*F
B*D + C*F + A*B*C*E + A*D*E*F
A*B*C + A*D*F + B*D*E + C*E*F
A*B*D + A*C*F + B*C*E + D*E*F

```

Imatge 17: Estructura de les possibles confusions del disseny

El minitab calcula els àlies de forma automàtica, d'aquesta manera ens estalviem fer les combinacions. La nomenclatura que utilitza és la de utilitzar el signe més (+) per a indicar que son equivalents, i per tant, son objectes de confusió. Podem comprovar que la resolució és IV i que aquests àlies confirmen la taula del punt 7.2.3.

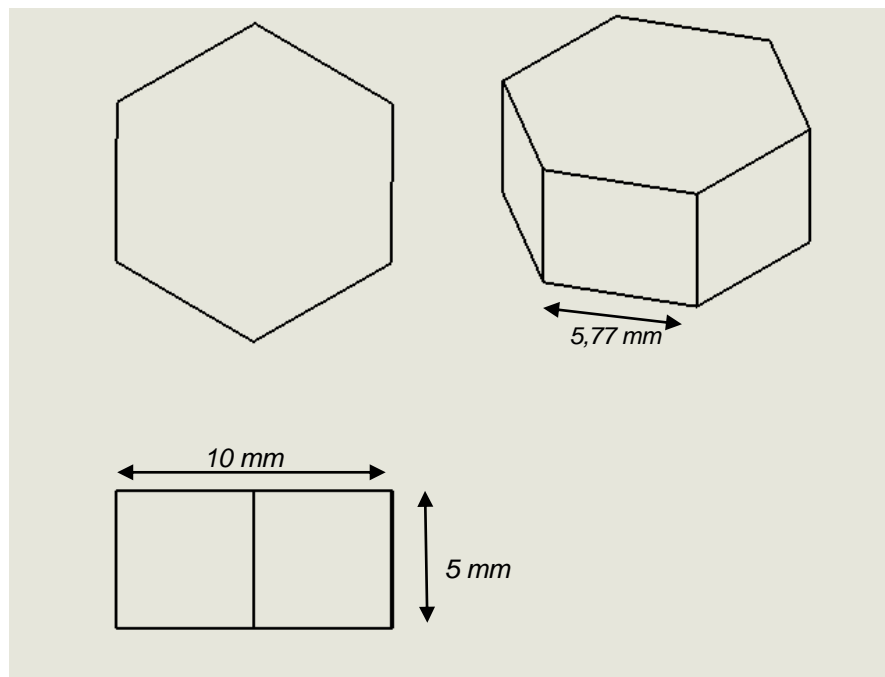
8. Execució de l'estudi factorial

8.1. Disseny de la peça

La primera geometria que s'ha valorat ha estat un cub. Es necessita una peça senzilla que permeti valorar la qualitat de la impressió sense massa complexitat. També és un requisit que la geometria es pugui completar amb un ompliment linear, ja que així tenim una certa simetria en la peça. Després de fer alguna prova, es va veure que amb el cub no s'estava posant a prova del tot la precisió de la impressora, doncs només té angles rectes i és una geometria que només requereix de dos moviments.

El disseny que finalment s'ha utilitzat per a fer els experiments ha estat un hexaedre. Amb aquesta geometria sí que es posa a prova la traça de les línies i dels angles.

Les dimensions de l'hexaedre han estat les següents.



Imatge 18: Captura del plànol de SolidWorks

Es buscava que fos una peça petita, així es garantia un temps de impressió reduït. També una raó de pes per fer-la d'aquestes dimensions ha estat el material del que es disposa. Al ser poc, s'ha de mirar que el material requerit per fer els experiments no superi el que tenim

8.2. Procés d'impressions

El procés de les impressions ha estat executat al llarg de tres dies diferents. S'ha tingut en compte que els factors de soroll que s'havien de bloquejar fossin bloquejats.

El primer dia, el 10 de desembre del 2019, es van imprimir els cinc primers experiments amb pellets petits. Va haver-hi alguna complicació a l'hora de canviar els pellets de diàmetre mig amb els de diàmetre petit. La cinta que transporta el moviment del motor a l'extrusor no tensava el suficient per a que el cargol que impedeix el moviment vertical del cargol sense fi no toques amb la caixa del motor. Finalment, es va solucionar mirant de cargolar més el cargol i tensar al màxim la cinta.

Es va trobar problemes de taps entre les impressions de l'experiment 4 i 5. Es va solucionar amb el procediment indicat al punt 6.2. La temperatura era de 22,8°C i la humitat relativa era del 31%.

Es va continuar fent els experiments el dia 11 de desembre de 2019, on es van realitzar les impressions dels experiments 6 al 12, ambdós inclosos. Durant aquest dia, es va haver de canviar de material en l'experiment numero 9, i va haver-hi complicacions. El cargol que limita el moviment vertical va tornar a fer nosa. Es va solucionar un altre vegada provant de tensar al màxim la cinta de transmissió. La solució és vàlida, però comporta sempre varis intents. Un cop buidat el material anterior es va començar a imprimir amb els pellets més fins. A simple vista s'ha observat un augment de la quantitat de material, que s'haurà de corroborar amb l'estudi factorial.

A part d'això, es va tenir que solucionar un tap durant les impressions de l'experiment 7. La temperatura ambient va ser molt similar a la del dia anterior, 22,9°C. La humitat relativa va ser igual, del 31%.

El tercer dia d'impressió va ser el dia 13 de desembre. Es van acabar les impressions, i es va tornar a fer la impressió 9 ja que a l'anàlisi de les dades, s'ha vist que en el pes i el la altura, hi havia una diferència més elevada del que tocava entre les dues peces impreses.

Així, s'ha finalitzat les impressions de tots els experiments de l'estudi.

Tots els experiments s'han realitzat dues vegades, exceptuant els experiments 2,3,5,6,7,11,14 i 15 que s'han hagut de realitzar tres vegades. La raó d'aquestes diferències és senzilla: per poder dir que s'ha realitzat bé la impressió les dues mostres han de ser semblants. Del contrari, podríem estar imprimint malament, es podria haver format algun tap entre mostra i mostra, etc... En aquests casos, s'ha procedit a fer una tercera impressió, i fins i tot una quarta, fins que les dues impressions siguin semblants entre elles.

8.3. Tabulació de la variable resposta

Amb les impressions ja fetes, ara toca mesurar les peces. Per a poder efectuar l'estudi factorial només falta obtenir les variables que faran de "variable resultat". Aquestes, com s'ha explicat amb anterioritat al punt 7.3.1, seran:

- Una variable dimensional basada en l'altura de la peça i l'amplada de la base
- Una variable basada en el pes de la peça
- Un tercer grup, on s'inclouen l'adhesió a la primera capa, la rugositat, la verticalitat i l'estat de la última capa.

Dimensió

S'ha mesurat cadascuna de les amplades de la base de la peça, i s'ha fet la mitjana. També s'ha anotat la diferència entre la màxima i la mínima, per a poder tenir un índex de deformitat. Quan es diu base, es refereix a la distància entre costats paral·lels de la base, per tant es fa la mitjana de les tres mesures.

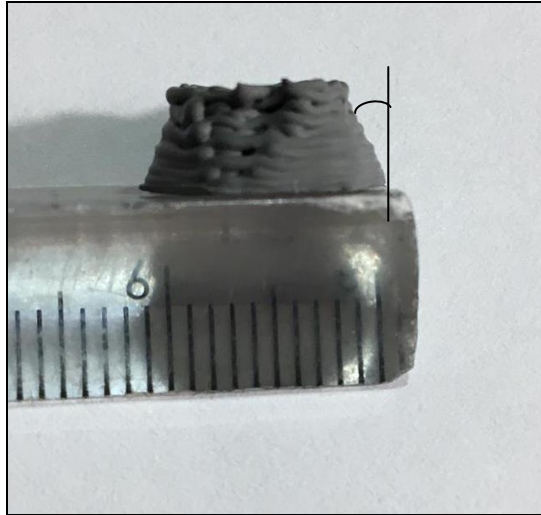
També s'ha mesurat la altura de les dues peces de cada experiment. Aquestes dues mesures s'han realitzat amb un peu de rei digital amb precisió al tercer decimal.

Pes

S'ha mesurat el pes de cadascuna de les mostres amb la balança del laboratori. La balança que s'ha fet servir, és el model Discovery de la casa OHAUS, i té una precisió de fins al sisé decimal mesurant en grams.

Verticalitat

La mesura de l'angle format entre l'aresta de la peça i la vertical ha estat complicada de fer directament. Les petites dimensions de la peça i l'angle petit ha dificultat fer-ho de manera directe. Per això s'ha optat per mesurar l'angle a partir de fotografies de la peça ampliades. Aquí es mostra un exemple, en concret del segon experiment.



Imatge 19: Detall de la mesura de la verticalitat

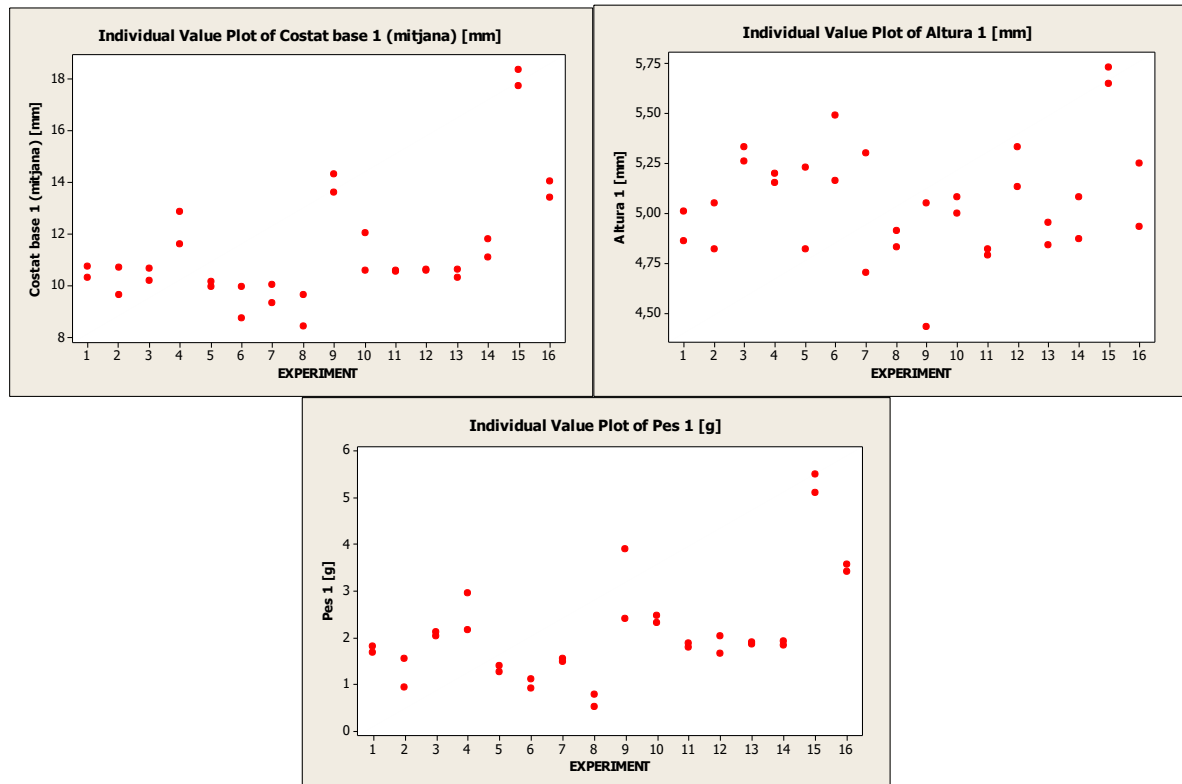
La mesura del costat que correspon al cosinus amb la fotografia a una escala ampliada val 1,8cm mentre que el que correspon al sinus a la mateixa escala val 0,7 cm. Com l'angle és adimensional, s'ha tret que l'angle val $21,25^\circ$. Així podem determinar que l'aresta que hauria de ser vertical (90°) en aquest experiment val $68,74^\circ$.

D'igual manera s'ha procedit a fer els altres experiments del disseny factorial.

Com a resultats de les anteriors mesures s'han obtingut els valors que es mostren a les taules de l'Annex 3.

9. Resultats de l'estudi factorial

Abans de començar a estudiar l'efecte dels factors sobre les variables resposta, s'ha de fer un estudi de les dades obtingudes. Els valors tabulats a l'Annex 3 han estat subjectes a un estudi per veure si presentaven alguna dada estranya que pogués ser considerada un *outlier*.



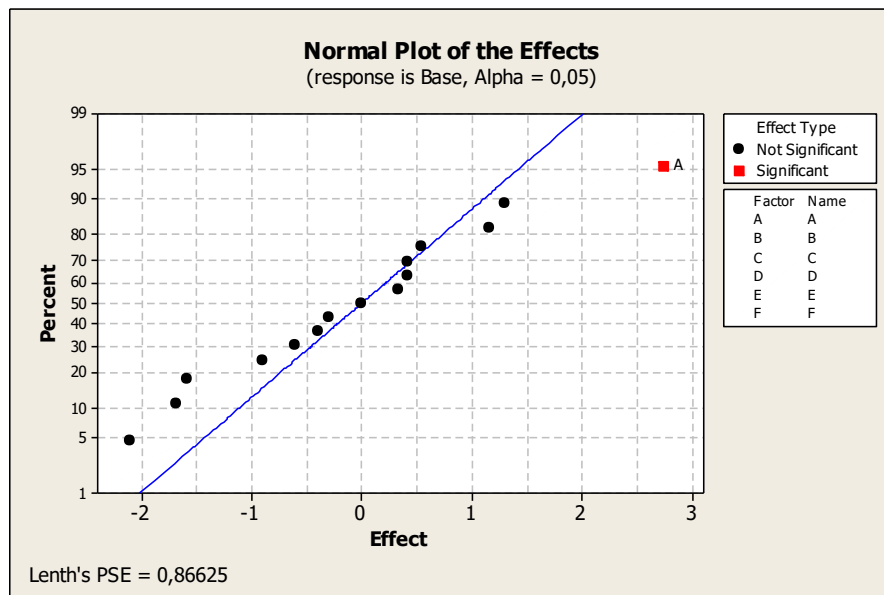
Imatge 20: Gràfica dels valors obtinguts estratificat per Altura/Base/Pes

Es pot observar que l'experiment 15 es desmarca una mica dels valors de la resta. No és preocupant, doncs la variabilitat entre les dues peces que s'han fet, és semblant a les demés. De fet, al estudiar les dades, s'ha tornat a mirar si s'ha realitzat bé la mesura i la impressió ha estat per l'experiment 9, que té una diferència entre les dues mostres força major a la dels altres experiments en la gràfica del pes i la de l'altura.

9.1. Variable resposta: DIMENSIONAL

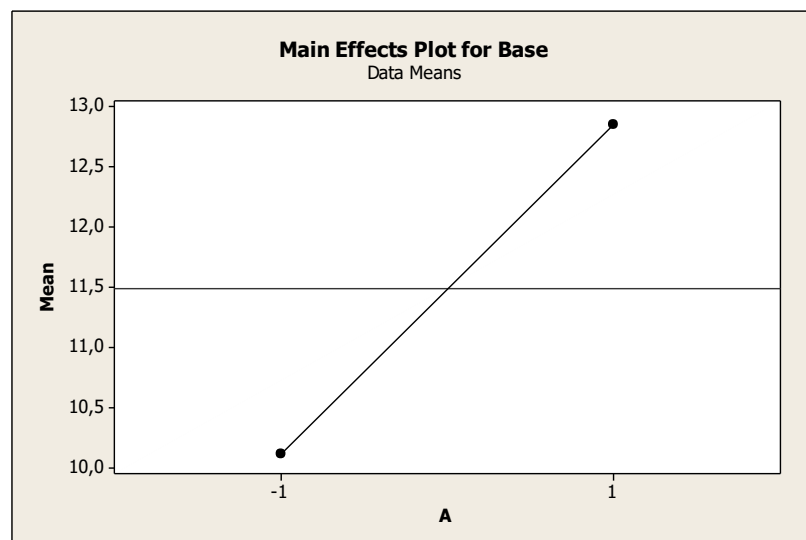
Per a obtenir la variable resposta, s'ha fet la mitjana de les dues peces de cada experiment. Al Minitab s'ha fixat que un factor sigui significatiu amb un p-valor del 0,05, és a dir, amb un 5% d'error com a màxim. Aquesta xifra és la que està establerta per la comunitat per a poder dir que els factors són de veritat influents sobre la resposta.

Fent un anàlisi del disseny factorial fet a *Minitab*, s'obté la següent informació:



Imatge 21: Gràfica normal de l'estudi dimensional

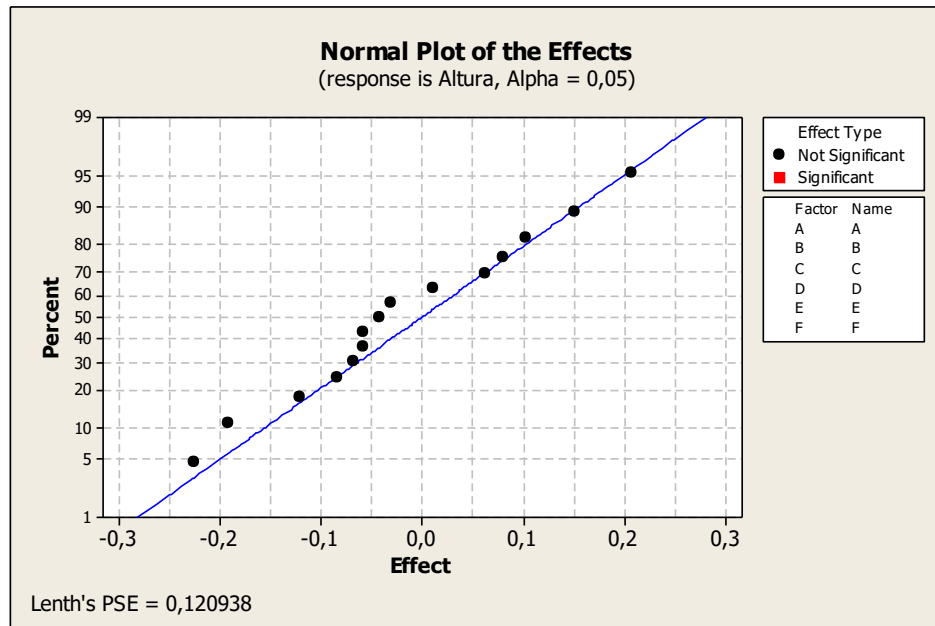
A la imatge 21 es pot veure com l'únic factor que afecta a la dimensió de la base és el factor A que correspon a la Temperatura de la tovera. La manera en que afecta aquesta variable a la dimensió de la base es pot veure fent un *Factorial Plot*.



Imatge 22: Gràfica d'efectes del factor A

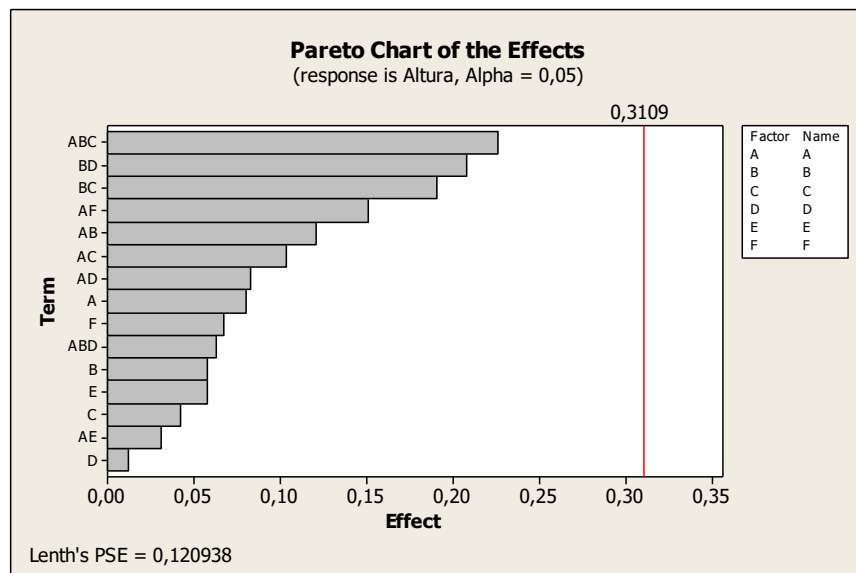
Es pot veure com el nivell alt de temperatura comporta que la variable resultat, en aquest cas la dimensió de la base de la peça, augmenti.

Per a la altura de les peces s'ha fet el mateix procediment, obtenint els següents resultats:



Imatge 23: Gràfica normal de l'estudi de l'altura

Es pot veure que la anàlisi no dona cap factor significatiu. Investigant una mica més en l'estudi, es pot veure que el factor que més influeix, no és un factor sinó que és una interacció entre A, B i C. Com a la taula de confusions ABC no té cap confusió amb un sol factor, l'estudi acaba aquí.



Imatge 24: Gràfic de Pareto dels efectes

9.2. Variable resposta: PES

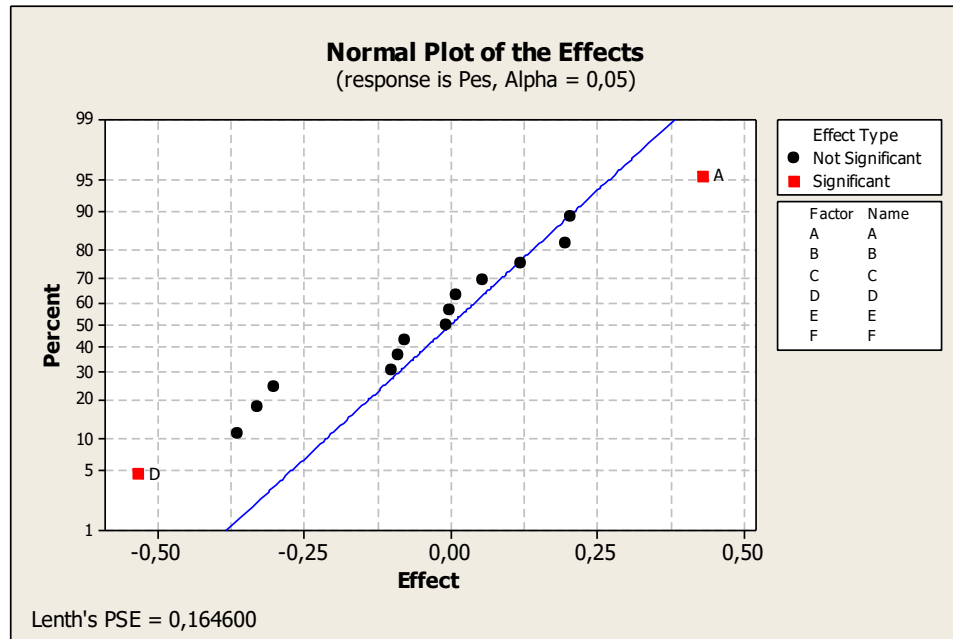
S'ha tabulat el pes de cadascuna de les peces de cada experiment en un Excel del que es

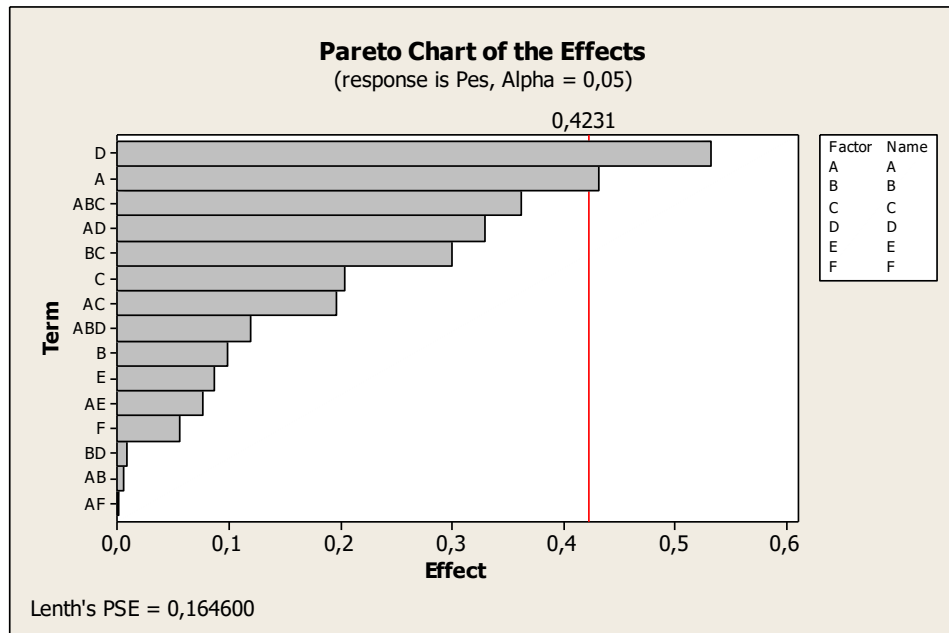
pot veure una captura a continuació. S'ha agafat el valor arrodonint-lo al tercer decimal. La variable resposta final ha estat la mitjana dels dos valors de cada experiment.

				ESTUDI DENSITAT		
	EXPERIMENT	Tª ambient	Humitat	Pes 1 [g]	Pes 2 [g]	VARIABLE RESULTAT: PES
Dia 1	DOE1	22,8ºC	31%	1,82	1,67	0,769400353
	DOE2	22,8ºC	31%	1,548	0,923	0,544753086
	DOE3	22,8ºC	31%	2,04	2,112	0,915343915
	DOE4	22,8ºC	31%	2,158	2,959	1,12808642
	DOE5	22,8ºC	31%	1,386	1,262	0,58377425
	DOE6	22,9ºC	31%	0,91	1,104	0,444003527
Dia 2	DOE7	22,9ºC	31%	1,556	1,475	0,668209877
	DOE8	22,9ºC	31%	0,781	0,507	0,283950617
	DOE9	22,9ºC	31%	3,896	2,397	1,387345679
	DOE10	22,9ºC	31%	2,32	2,473	1,056657848
	DOE11	22,9ºC	31%	1,871	1,784	0,805776014
	DOE12	22,9ºC	31%	2,041	1,648	0,813271605
Dia 3	DOE13	23,2ºC	49%	1,896	1,8518	0,826234568
	DOE14	23,2ºC	49%	1,824	1,926	0,826719577
	DOE15	23,2ºC	49%	5,497	5,104	2,337081129
	DOE16	23,2ºC	49%	3,568	3,41	1,538359788

Imatge 25: Valors de la variable resultat

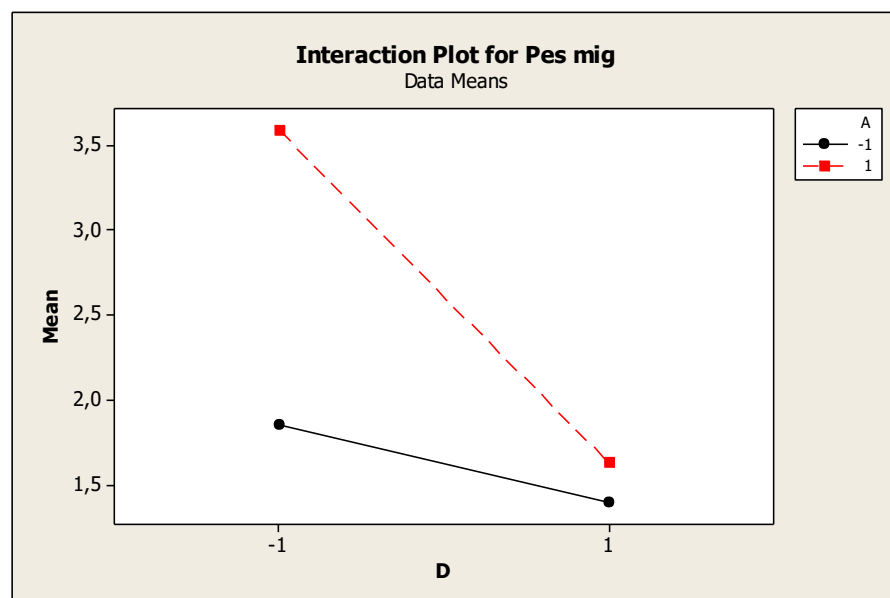
Fent un anàlisi del disseny factorial a *Minitab*, i representant els efectes en una gràfica Normal, es troba com a efectes principals significatius el A (Tª de la tovera) i D (Diàmetre dels pellets).





Imatge 26: Resultats de l'estudi de la variable resultat "pes"

Pel factor A, l'efecte és 0,4318; pel factor D l'efecte és de 0,5317. Les unitats de l'efecte són grams, ja que la variable resposta està tabulada en grams. Es pot veure que encara que no sigui significatiu, la interacció entre AD té un efecte important. S'ha d'estudiar quina influència tenen A i D sobre el resultat, i ja de pas, quina interacció hi ha entre ells. Al *Minitab*, es fa un estudi Stat-DOE-Factorial-Factorial Plot, i s'escull la variable resposta que es vol estudiar (PES) i els factors que es vol comparar (A i D).



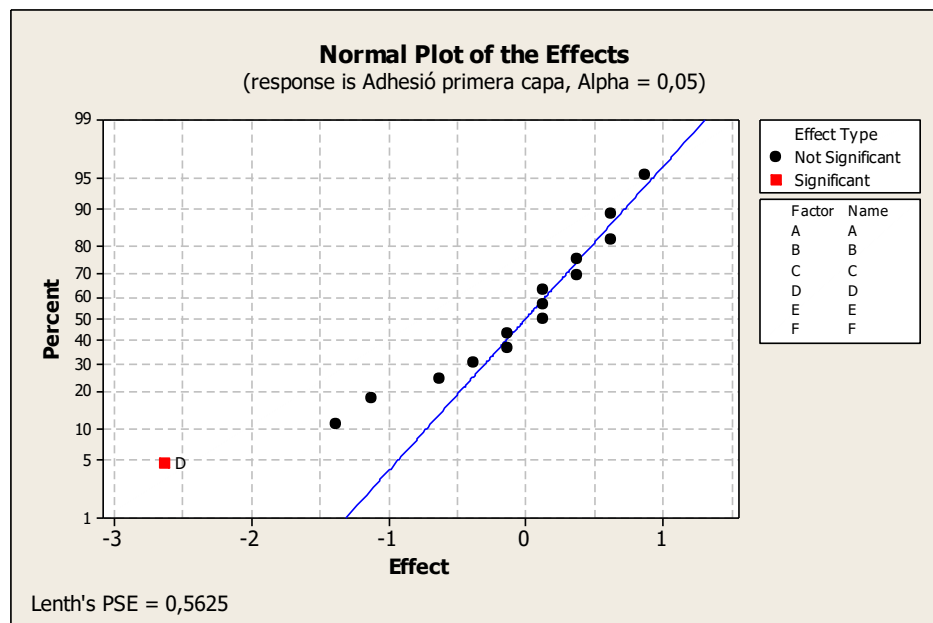
Imatge 27: Gràfica de interacció entre A i D

Es pot veure que per al nivell baix de D (diàmetre petit de pellets) el pes de les peces puja. En canvi, el nivell alt de D estabilitza bastant el resultat, independentment del nivell que tingui A. Per tant, es pot concloure que pel que fa al pes de la peça té una influència categòrica el diàmetre dels pellets. I que en el cas de que el diàmetre sigui el nivell baix, la temperatura de la tovera influeix molt en el pes de la peça.

9.3. Altres variables resposta

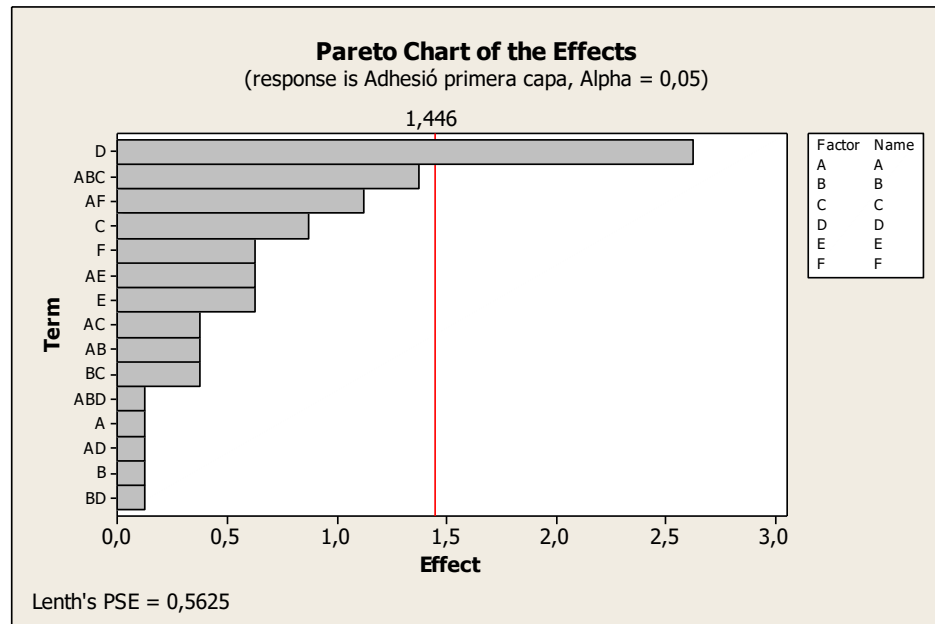
9.3.1. Adhesió de la primera capa

La variable resultat ha estat la mitjana de les dues puntuacions que se'ls hi ha atorgat a cada peça de cada experiment. Al analitzar amb un Anàlisi factorial a *Minitab*, es troba que D torna a ser un factor significatiu.



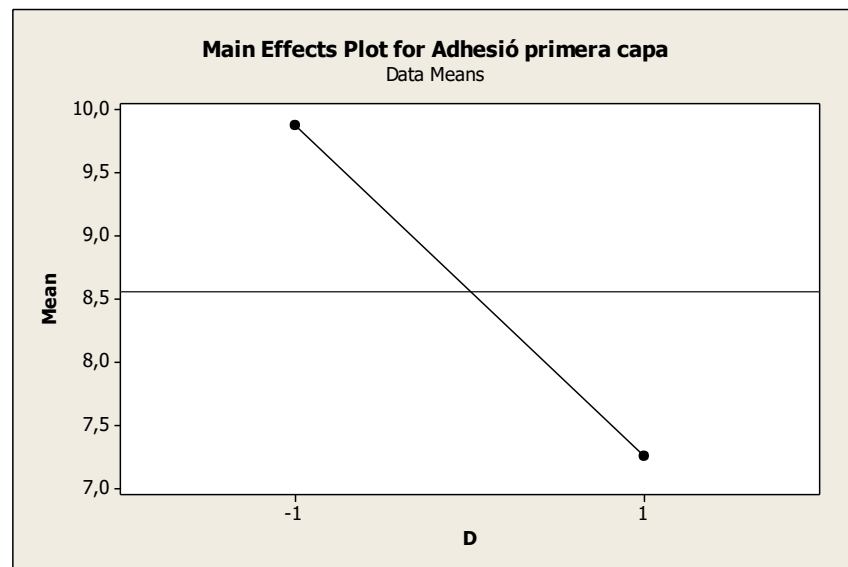
Imatge 28: Gràfica normal dels efectes d'adhesió de capa

Si es mira els altres punts de la gràfica normal de la imatge 28 al diagrama *Pareto* (imatge 29), es troba que la interacció entre ABC i AF estan a prop de ser significatius:



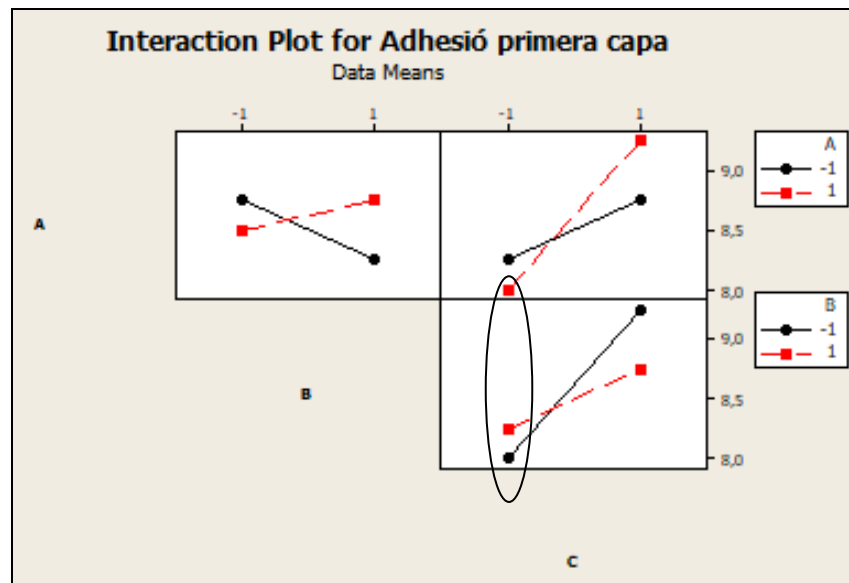
Imatge 29: Diagrama de Pareto de "Adhesió de capes"

Al mirar de quina manera afecta la variable D a la adhesió de la primera capa, es pot veure que amb el nivell baix de la variable augmenta l'adhesió.



Imatge 30: Efectes del factor D

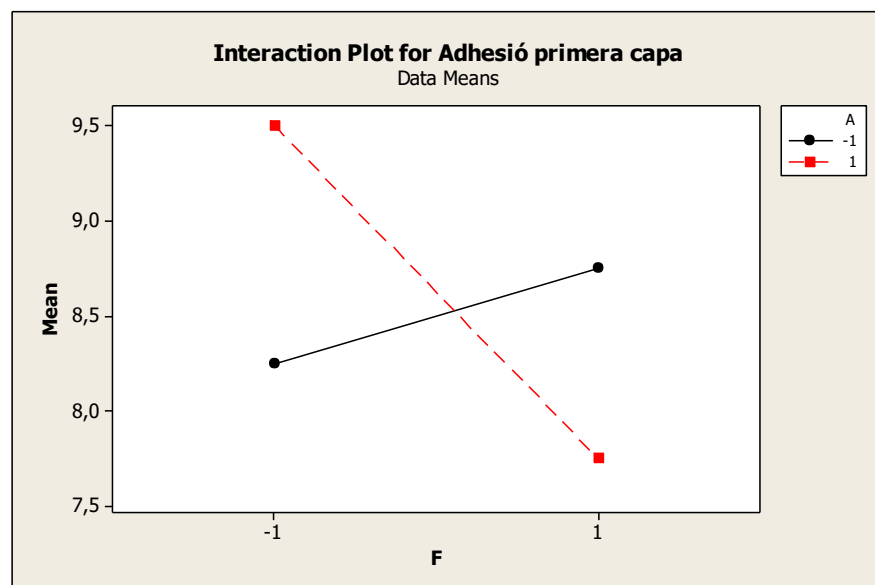
Al diagrama de *Pareto* es pot observar una interacció entre ABC. ABC s'estudiarà encara que no hi ha cap confusió possible entre ABC i una interacció de 2 factors, així com tampoc amb un efecte principal. L'estudi d'aquest cas ens pot donar informació d'algun factor que pugui influenciar al resultat, encara que no sigui significativament.



Imatge 31: Interacció entre A, B i C

Es pot veure que al nivell baix de C, la resposta queda rebaixada independentment dels nivells de A i B. En canvi, no es pot extreure cap comportament fixant nivells a A i B. Per tant, es pot concloure que C no és significatiu, però el seu nivell baix condiona de manera clara els resultats de l'experiment.

S'ha fet també un estudi de la interacció entre A i F:



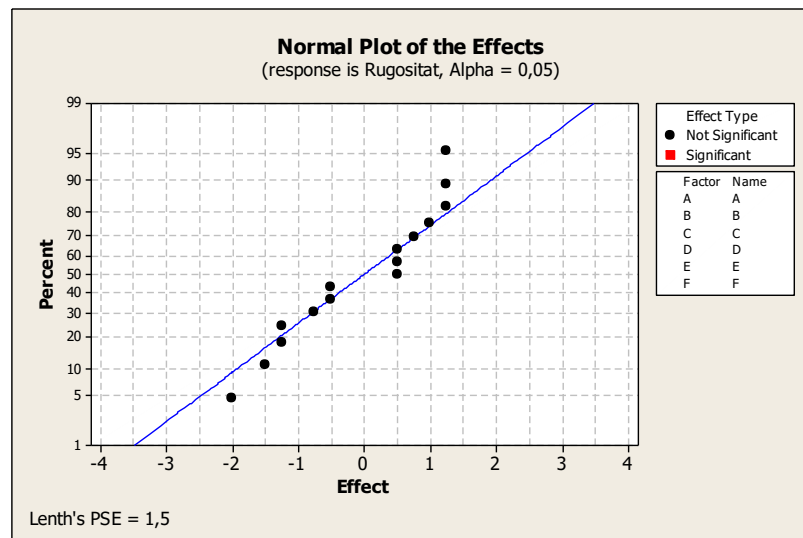
Imatge 32: Interacció entre A i F

Llegint la gràfica de la imatge 32, es pot deduir que hi ha una interacció entre A i F, de manera que quan la variable A es troba al nivell baix, el nivell de la variable F quasi no té efecte en la resposta. En canvi, quan a la variable A se la situa al nivell alt, el nivell de la

variable F té molt a dir. Per tant, es podria dir que la variable F és significativa quan el nivell de A és alt.

9.3.2. Rugositat

S'ha avaluat la rugositat que hi ha entre les capes per veure quins factors podien ser importants a l'hora de millorar la qualitat de la peça. S'ha de dir que no s'ha aconseguit l'eina correcte per a poder mesurar la rugositat de forma òptima. S'ha avaluat de manera poc empírica, atribuint una escala del 1 al 10 segons la rugositat que s'ha aconseguit a la *Sample 13* (veure Annex 2).

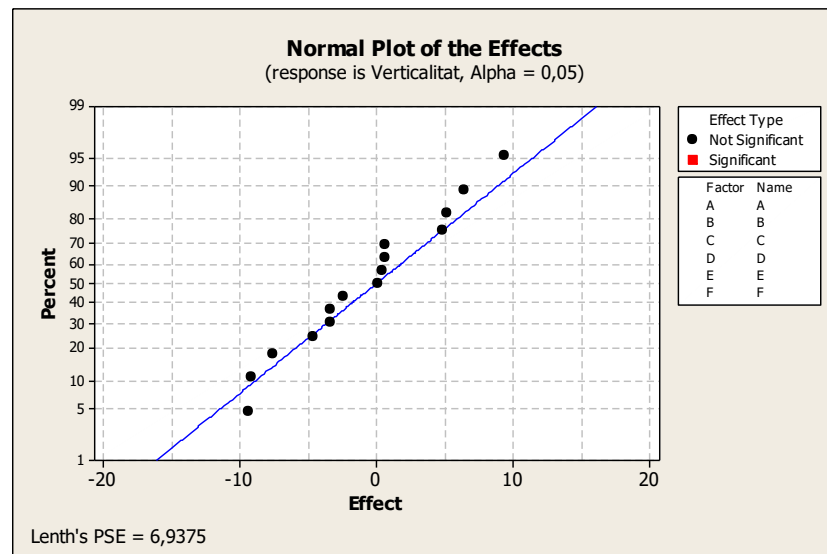


Imatge 33: Gràfica normal de l'estudi "rugositat"

L'estudi no ha donat cap factor significatiu. És una llàstima, doncs es pot atribuir a l'error que pot comportar avaluar un paràmetre sense mesurar empíricament les mostres.

9.3.3. Verticalitat

Al analitzar l'efecte dels factors sobre la variable resultat de la verticalitat, s'ha trobat el següent:

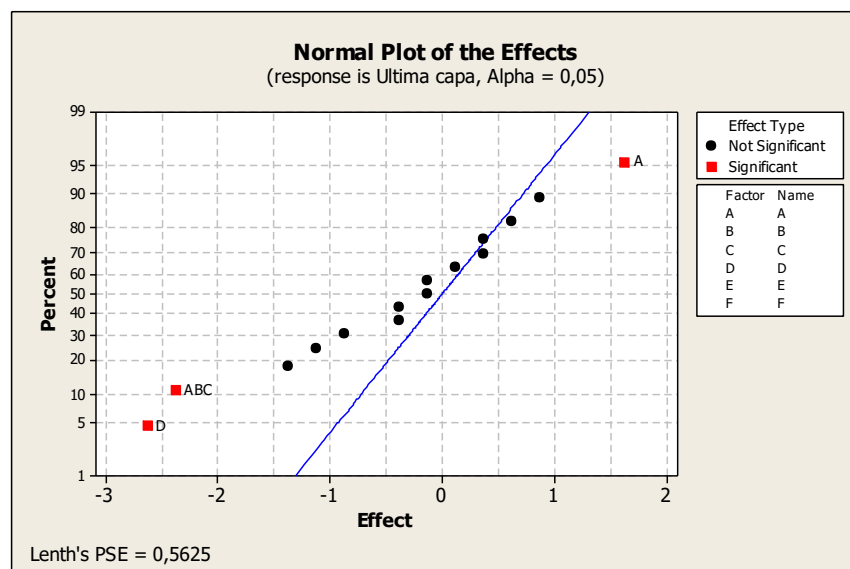


Imatge 34: Gràfica normal de l'estudi "verticalitat"

Cap factor resulta significatiu. Això pot indicar que la verticalitat de l'aresta és una conseqüència d'altres efectes, i no és un efecte directe que està relacionat amb cap causa concreta. De nou s'ha trobat que no hi ha cap factor amb el que es pugui controlar la variable resultat "verticalitat".

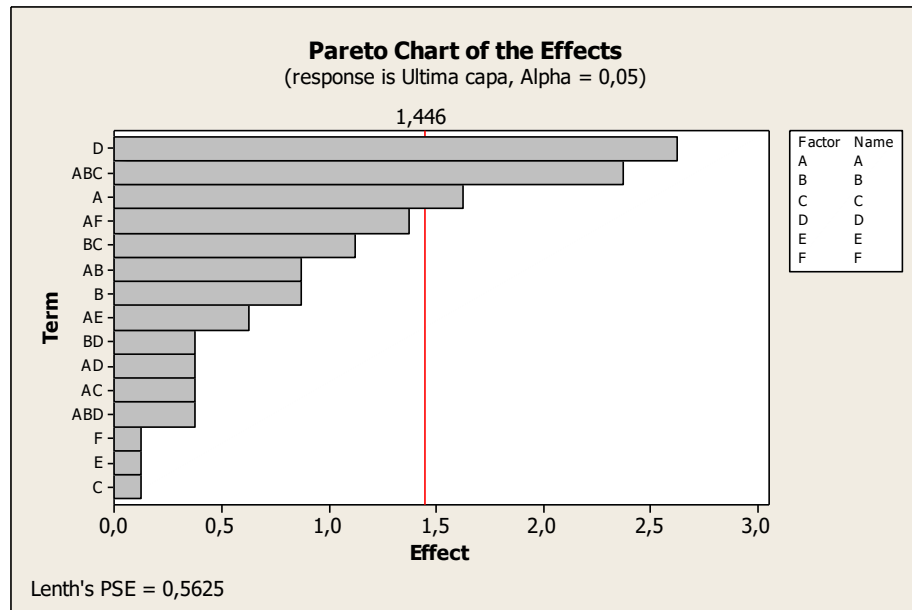
9.3.4. Ompliment de l'última capa

L'estudi factorial a *Minitab* retorna la gràfica de la imatge 35:



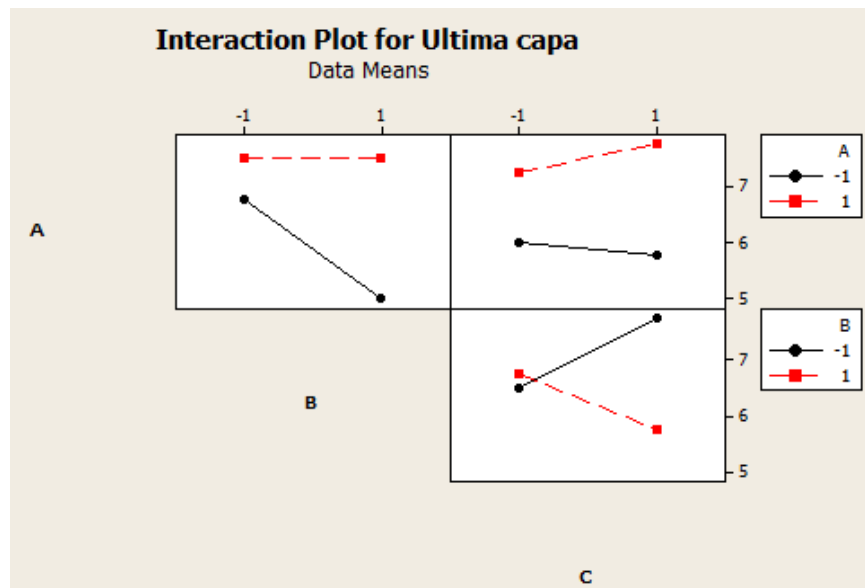
Imatge 35: Gràfica normal de l'estudi "última capa"

Com es pot veure, es marquen significatius els factor A, D i la interacció ABC. El diagrama de *Pareto* mostra que clarament els efectes més destacats son D i la interacció ABC.



Imatge 36: Diagrama de Pareto de l'estudi "última capa"

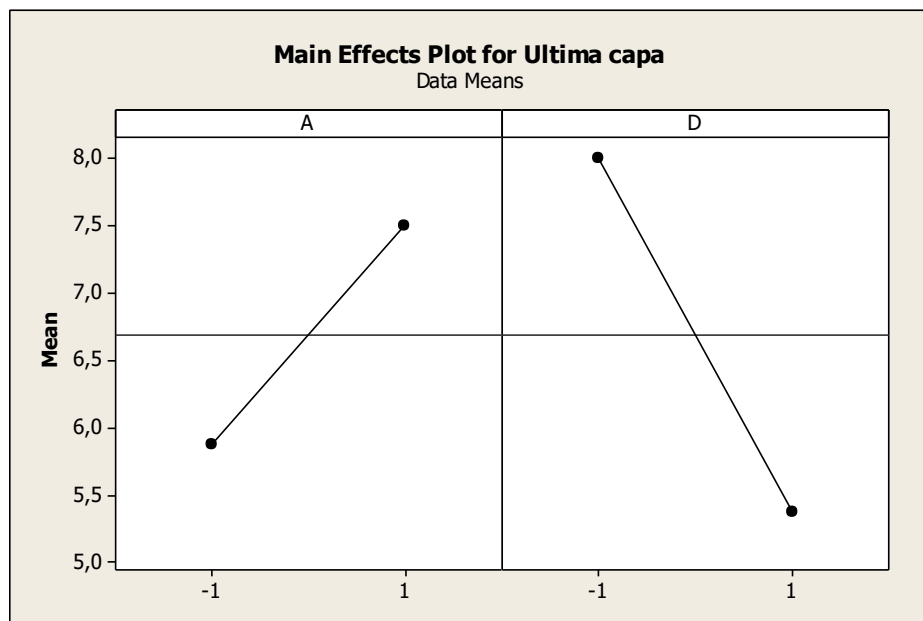
Com ja s'ha estudiat per al cas de l'adhesió a la primera capa, la interacció ABC no ens ha de preocupar, doncs és una interacció entre tres factors que no té confusions preocupants. Tot i així, s'estudiarà la manera en que afecten els tres factors que intervenen per veure si es pot treure informació rellevant.



Imatge 37: Interaccions entre A, B i C

Es pot veure que al nivell alt de C, la resposta té molta variabilitat en funció dels nivells de A i B. A part d'aquesta informació, no es pot extreure cap altre comportament. Per tant, es pot concloure que A és significatiu, doncs el seu nivell baix condiciona de manera significativa els resultats de l'experiment.com ja s'havia vist en la gràfica Normal, i B encara que no sigui

significatiu, si el valor de C es fixa al nivell alt, pot arribar a tenir molta influència sobre el resultat.



Imatge 38: Estudi dels efectes de A i D

El factor A puja la resposta amb el nivell alt, mentre que el factors D ho fa amb el nivell baix.

10. Estudi del diàmetre de la tovera

El diàmetre de la tovera ha estat un factor bloquejat en un nivell de 0,8 mm. Aquests estudi ve a causa de que és important saber quines possibilitats ofereix el conjunt de l'extrusora i el material.

Els principals avantatges que té imprimir amb un diàmetre més petit son les relacionades amb la geometria de la peça. És pot acostar més a les dimensions requerides pel disseny, a les toleràncies establertes. També, es podria argumentar que amb valorant el comportament mecànic, amb capes compostes de filaments més prims es pot aconseguir que hi hagi més contacte entre superfícies, i per tant unes millors prestacions en quant a la resistència mecànica.

El procediment de l'estudi ha estat senzill. S'ha procedit a canviar la tovera de l'extrusor, i s'ha imprès les mostres que amb la tovera de 0,8mm donaven bons resultats.

La primera de totes ha estat la Sample13, que és la que millors resultats va obtenir amb l'anterior tovera. Els paràmetres de la Sample13 són:

Tª tovera 180°C Tª llit= 90 M221=5 Gruix capa: 0.3mm

Durant la impressió s'ha observat que al reduir el diàmetre de la tovera, el flux és insuficient. També, es segueix tenint problemes amb la verticalitat de les arestes. Els paràmetres que amb una tovera de 0,8mm funcionaven, es veu clarament que no funcionen amb un diàmetre diferent.



Imatge 39: Sample13 impresa amb la tovera de 0,4 mm

Per a corregir l'error, s'ha procedit a fer una impressió de la Sample 5, molt semblant a la 13, però incrementant el flux de material. Els paràmetres de la Sample5 són:

Tª Tovera: 180°C Tª llit: 120°C M221: 5 Gruix capa: 0.2mm

Aquesta ha resultat millor, ja que clarament el posar més flux era una necessitat real per a

aconseguir un bon emplenament de la geometria, però no és òptim. La verticalitat de les arestes si que ha estat corregida, i la forma geomètrica és prou bona.



Imatge 40: Mostra de la Sample5 amb tovera de 0,4mm

Per mirar d'acabar de corregir el flux, que tot i que ha millorat, no és bo, s'ha procedit a imprimir la Sample4, que afegeix un punt més al M221.



Imatge 41: Mostra de la Sample4 amb tovera de 0,4mm

Es veu doncs, que el canvi de tovera implica estudiar una vegada més els valors que han de prendre tots els paràmetres que influeixen en la impressió.

En el cas de la tovera de 0.4mm es veu que es possible imprimir, que no hi ha impediments físics de falta de fluïdesa del material, d'elevat massa la temperatura, etc. L'únic impediment és que s'ha de tornar a fer un estudi de quina és la finestra de valors que poden prendre els paràmetres.

Conclusions

En primer lloc, s'ha vist que la impressora amb la que s'ha treballat ha donat els resultats que s'esperava. Tot i no haver invertit massa pressupost, s'està satisfet del rendiment que ha donat. Potser amb una millor impressora s'hagués evitat els problemes relacionats amb els taps o s'hagés pogut afilar més prim amb el gruix de capa i la precisió de la geometria. Tot i així, aprenent a aconseguir una regularitat en el funcionament de la impressora, s'ha pogut fer un bon estudi.

Per a futurs estudis, s'ha vist que part de l'èxit d'una impressió ve determinat per el funcionament de la impressora. Aquest funcionament no es pot parametritzar. S'ha de tenir experiència per saber identificar els errors, comportaments estranys, falta d'extrusió de material, imprecisions de localització de la tovera, etc...

Amb la capacitat de comparació obtinguda al haver estat treballant amb els dos materials – 316L i CrCoMo - es pot resoldre que s'obté millor impressió amb el 316-L. El material d'estudi CrCoMo dona molts problemes, doncs amb les altes temperatures, adquireix una forma pastosa que és poc consistent. Això dificulta que la peça tingui unes bones característiques geomètriques. A més, se li afegeix que no es coneix la seva composició.

De l'estudi dels factors, es pot concloure que els factors que més influència tenen sobre la impressió en CrCoMo son el factor A i el D, que corresponen a la Temperatura d'extrusió i al Diàmetre del pellet. Aquests, milloren la impressió quan el diàmetre dels pellets es redueix, i quan la temperatura d'extrusió augmenta.

De manera puntual, s'ha trobat que el factor F que correspon al gruix de capa és força significatiu quan es manté la temperatura de la tovera en un nivell alt.

Pel que fa al diàmetre de la tovera, s'ha vist que hi ha una finestra ampla, doncs fins a 0,4mm, que és el diàmetre mínim del que es disposava, el material ha donat bons resultats. Això no treu que per a cada canvi de diàmetre, els paràmetres d'impressió canviïn. S'ha d'ajustar els paràmetres a cada diàmetre, en especial els paràmetres que afecten de manera directa al flux.

Per acabar, s'ha vist que les millors condicions amb les que s'ha imprès han estat les de la Sample 13 (veure a l'Annex 6). Les peces impreses amb aquests paràmetres pesen 2,267 grams, aconseguint una densitat de $4,76 \text{ g/cm}^3$. Indica per tant que no només s'ha aconseguit una bona geometria sinó que també s'ha aconseguit un ompliment del 97,7%.

Agraïments

Primer de tot, agrair a la Jessica Calvo la seva dedicació durant el treball, per donar-me la oportunitat de descobrir el món de la investigació, aconsellar-me i obrir-me les portes del grup.

També l'Alfons Riera i el Gregori per ser els companys amb els que he compartit aquests mesos. Per tots els favors que m'han fet, anant a pesar peces, a mesurar densitats quan el meu horari no encaixava amb els horaris del laboratori. Però més enllà dels favors puntuals, per compartir les tardes tant divertides davant la impressora.

També a l'Antonio Trueba, per refrescar-me conceptes d'estadística i deixar-me els apunts de l'assignatura per poder fer l'estudi factorial fraccionat.

Al Crisanto Villalobos per oferir-me ajuda sempre, tant habitual en ell. Per presentar-me la Jessica i convèncer-me per prendre la decisió de fer el treball de fi de grau dins de l'àmbit de la investigació universitària.

Finalment, tot i que no l'he arribat a conèixer, al Tim, que va ser qui va començar a muntar la impressora, el que va començar a imprimir peces, i el que d'alguna manera, ens ha estalviat molts problemes als que hem vingut darrera. Per compartir-nos el seu coneixement a través del TFM, que tant ens ha ajudat a no començar de zero.

Bibliografia

- [1] TIMOTHY O. *Manufacturing and characterization of components produced via fused deposition modelin (FDM) utilizing metal injection molding (MIM) feedstock qith a focu on steel alloy 316L*. PROCOMAME, UPC. Juny 2019.
- [2] EUROPEAN POWDER METALLURGY ASSOCIATION, Introduction to additive manufacturing Technology.
- [3] M. BELTRÁN , A.MARCILLA TECNOLOGÍA DE POLÍMEROS. *Apuntes “Tema 4: extrusión”*.
- [4] PRUSA, JOSEF: PRUSA 3D MANUAL, Handbook version. September 07, 2018.
- [5] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. DEPARTAMENT D'ESTADÍSTICA Apunts de tècniques estadístiques per a la qualitat. *“Dissenys factorials complets i fraccionats”*. 2015.
- [6] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. DEPARTAMENT D'ESTADÍSTICA Apunts de tècniques estadístiques per a la qualitat: “Relació entre disseny d'experiments i regressió. Creació del model”. 2015.
- [7] MODEL ORIGINAL PRUSA 3D MULTI MATERIAL *Informació sobre la impressora d'estudi*. <https://www.prusa3d.es/original-prusa-i3-multi-material-2-0/> , [13 de novembre de 2019]
- [8] MODEL DE L'EXTRUSOR DIRECT 3D I ESPECIFICACIONS. Especificacions tècniques de l'extrusor utilitzat. <https://www.direct3d.it/> , [7 de desembre de 2019]
- [9] RIERA BRELL, ALFONS .Estudi de la tècnica de MEAM utilitzant pellets de MIM aplicada a productes comercials”, PROCOMAME UPC, 2020
- [10] UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, *Introducción a la tecnología MIM* http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/grupos_investigacion/tecnologia_polvos/powder_tech_nology_research_group/Research%20areas/Powder%20Injection%20Molding, [15 de novembre de 2019]
- [11] GONZALO.J, Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. [May 2018]
- [12] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA, Density determination Kit, Documentació dels laboratoris del Campus UPC-Besós

